

Treball de Fi de Grau

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

**Estudi del flux al voltant d'un  
perfil aerodinàmic**

**MEMÒRIA**

**Autor:** Carla Borràs Palau  
**Director/s:** Esteve Jou Santacreu  
**Any acadèmic:** 2016/2017



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona

Gener 2017



## Resum

Actualment, el procés per aconseguir un vehicle adequat per a la competició es basa en un estudi acurat d'un conjunt de branques de l'enginyeria com ara la mecànica, l'electrònica, l'automàtica, etc. Una de les més importants, però, és l'aerodinàmica.

Treballar amb aquesta ciència és força complex ja que un estudi implica una inversió bastant elevada. És per això que, idealment, quan s'analitza l'aerodinàmica d'un vehicle s'hauria de començar per fer una estudi per ordinador mitjançant un software que permeti simular les condicions a les que es pot trobar sotmès aquest vehicle i, a partir d'aquí construir un model a escala per tal de fer un assaig experimental. D'aquesta manera l'estudi surt a un preu més raonable ja que molts dels errors s'han pogut observar i solucionar prèviament durant la simulació teòrica, encara que es requereix un software molt potent que no sempre es té a l'abast.

En aquest projecte es pretén demostrar teòricament que una petita variació en l'estructura d'un aleró, en aquest cas l'àlep de Gurney, pot afectar considerablement a la seva aerodinàmica. Aquest estudi es realitzarà mitjançant el software Fluent, una eina del programa ANSYS Workbench encarregada de calcular i simular del comportament del flux d'un fluid en un entorn virtual.

Aquest projecte consta de dues parts principals, l'estudi d'un flux d'aire al voltant del perfil NACA 63412 i l'estudi del mateix flux d'aire al voltant del perfil NACA 63412 afegint-hi l'àlep de Gurney.

Finalment, s'inclou un anàlisi dels resultats obtinguts i les conclusions que s'han extret al llarg del treball.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>0</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. ÍNDEXS</b>	<b>5</b>
1.1. Índex de taules.....	5
1.2. Índex de gràfics.....	5
1.3. Índex de figures.....	6
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del projecte i motivació.....	9
2.2. Requeriments previs .....	10
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>12</b>
3.1. Objectius del projecte.....	12
3.2. Abast del projecte .....	13
<b>4. CONCEPTES TEÒRICS</b>	<b>15</b>
4.1. Una mica d'història.....	15
4.2. Els alerons.....	17
4.3. L'àlep de Gurney.....	19
4.4. Teoria aerodinàmica .....	20
4.4.1. Número de Reynolds .....	20
4.4.2. Capa límit.....	21
4.4.3. Coeficient de sustentació i de resistència a l'avanç.....	24
4.5. Tipus d'anàlisi.....	26
4.5.1. Anàlisi computacional de la dinàmica de fluids (CFD).....	26
<b>5. ESTUDI DE LA INFLUÈNCIA DE L'ÀLEP DE GURNEY</b>	<b>29</b>
5.1. Objectius .....	29
5.2. Metodologia.....	29
5.3. Estudi del perfil NACA 63412 .....	31
5.3.1. Generació de la geometria .....	31
5.3.2. Generació del mallat.....	33
5.3.3. Simulacions .....	36
5.4. Estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney .....	38
5.4.1. Generació de la geometria .....	38
5.4.2. Generació del mallat.....	40

5.4.3. Simulacions .....	41
<b>6. ANÀLISI DE RESULTATS .....</b>	<b>43</b>
6.1. Introducció .....	43
6.2. Resultats del estudi del perfil NACA 63412 .....	43
6.2.1. Estudi amb Spallart - Allarmas .....	43
6.2.2. Estudi amb $K - \varepsilon$ .....	50
6.2.3. Estudi amb $K - \omega$ .....	56
6.3. Resultats del estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney .....	63
6.3.1. Estudi amb Spallart - Allarmas .....	63
6.3.2. Estudi amb $K - \varepsilon$ .....	67
6.3.3. Estudi amb $K - \omega$ .....	71
6.4. Comparativa dels estudis del perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney .....	76
6.4.1. Estudi amb Spallart – Allarmas.....	76
6.4.2. Estudi amb $K - \varepsilon$ .....	78
6.4.3. Estudi amb $K - \omega$ .....	79
6.5. Revisió del perfil.....	81
<b>7. IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>84</b>
<b>8. PRESSUPOST .....</b>	<b>86</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>88</b>
<b>AGRAÏMENTS .....</b>	<b>90</b>
<b>ANNEX .....</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>99</b>
Referències bibliogràfiques.....	99
Bibliografia complementària.....	99

# 1. Índexs

## 1.1. Índex de taules

**Taula 1.** Components de la velocitat

**Taula 2.** Direccions dels components de resistència i sustentació

**Taula 3.** Resultats Spallart – Allarmas per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials

**Taula 4.** Resultats  $K - \varepsilon$  per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials

**Taula 5.** Resultats  $K - \omega$  per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials

**Taula 6.** Resultats Spallart – Allarmas pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

**Taula 7.** Resultats  $K - \varepsilon$  pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

**Taula 8.** Resultats  $K - \omega$  pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

**Taula 9.** Resultats Spallart – Allarmas pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney

**Taula 10.** Resultats  $K - \varepsilon$  pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney

**Taula 11.** Resultats  $K - \omega$  pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney

**Taula 12.** Pressupost del projecte

## 1.2. Índex de gràfics

**Gràfic 1.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de sustentació

**Gràfic 2.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de resistència a l'avanç

**Gràfic 3.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de sustentació

**Gràfic 4.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç

**Gràfic 5.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de sustentació

**Gràfic 6.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç

**Gràfic 7.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

**Gràfic 8.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

**Gràfic 9.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

**Gràfic 10.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

**Gràfic 11.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

**Gràfic 12.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

**Gràfic 13.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep

**Gràfic 14.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

**Gràfic 15.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep

**Gràfic 16.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

**Gràfic 17.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep

**Gràfic 18.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

## 1.3. Índex de figures

**Figura 1.** Renault Voiturette 1903

**Figura 2.** Tropfenwagen (cotxe gota)

**Figura 3.** Descomposició de les forces sobre un aleró

**Figura 4.** Despreniment de la capa límit al augmentar l'angle d'atac

**Figura 5.** Comportament del flux al voltant d'un perfil sense i amb l'àlep de Gurney

**Figura 6.** Remolins provocats per l'àlep de Gurney

**Figura 7.** Flux laminar i turbulent respectivament

**Figura 8.** Capa límit placa plana

**Figura 9.** Capa límit afectada per gradients de pressió

**Figura 10.** Capa límit laminar i turbulenta abans de la separació respectivament

**Figura 11.** Coeficients de sustentació i de resistència al aire de diferents perfils

**Figura 12.** Estudi d'un vehicle en 3D mitjançant CFD

**Figura 13.** Perfil NACA 63412 situat com a aleró

**Figura 14.** Perfil NACA 63412

**Figura 15.** Superfície envoltant el perfil

**Figura 16.** Corbes del perfil mal interpolades

**Figura 17.** Corbes del perfil ajustades correctament

**Figura 18.** Càlcul valor primera cel·la

**Figura 19.** Malla 1 perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney

**Figura 20.** Malla 2 perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney

**Figura 21.** Perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

**Figura 22.** Unió del àlep amb l'aleró

**Figura 23.** Malla perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

**Figura 24.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allarmas per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 25.** Línies de corrent del model de Spallart – Allarmas per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 26.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allarmas per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 27.** Línies de corrent del model de Spallart – Allarmas per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 28.** Contorns de velocitat del model de  $K - \epsilon$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 29.** Línies de corrent del model de  $K - \epsilon$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 30.** Contorns de velocitat del model de  $K - \epsilon$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 31.** Línies de corrent del model de  $K - \epsilon$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 32.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 33.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 34.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 35.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 36.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allarmas perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 37.** Línies de corrent del model de Spallart – Allarmas perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 38.** Remolins generats per l'àlep de Gurney detectats pel model Spallart – Allarmas

**Figura 39.** Contorns de velocitat del model de  $K - \epsilon$  perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 40.** Línies de corrent del model de  $K - \epsilon$  perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 41.** Remolins generats per l'àlep de Gurney detectats pel model  $K - \varepsilon$

**Figura 42.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 43.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 44.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep a  $12^\circ$  d'atac

**Figura 45.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep a  $12^\circ$  d'atac

**Figura 46.** Vèrtex de la geometria del perfil





## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte i motivació

La idea de realitzar un projecte de fi de grau relacionat amb la aerodinàmica ve donada pel meu interès per la Mecànica de Fluids i la seva influència en el món de l'automobilisme.

Al final dels meus estudis de secundària, vaig desenvolupar el Treball de Recerca sobre l'evolució de la carrosseria de diferents vehicles al llarg dels anys. La conclusió que vaig treure va ser que aquesta evolució ha estat motivada, entre altres coses, per la millora de la aerodinàmica dels vehicles.

Gràcies als coneixements i eines obtinguts en les diferents assignatures cursades al llarg del Grau sobre la Mecànica de Fluids per dur a terme la simulació d'un flux al voltant d'un cos, vaig considerar ampliar el meu estudi assajant teòricament dos models en tres dimensions d'un mateix vehicle, un actual i un altre de fa uns anys, per poder així fer una comparativa de la millora en l'aerodinàmica basant-me en els resultats obtinguts.

Amb aquesta idea, em vaig posar en contacte amb en senyor Esteve Jou Santacreu, coordinador de l'assignatura de Mecànica de Fluids de l'ETSEIB i professor de la mateixa, per tal de que fos el tutor del meu projecte.

Una vegada analitzada conjuntament la proposta inicial, i donat els alts requeriments de la simulació en 3D, varem considerar més oportú basar el meu projecte de fi de grau en l'estudi de les conseqüències d'afegir l'àlep de Gurney a un aleró, ja que, treballant amb un espai de 2D és pot arribar a simular els efectes que aquest genera en el flux d'aire que l'envolta.

Aquest treball m'ha permès aprofundir en un àmbit que m'interessa, millorant al mateix temps el meu domini en l'eina ANSYS Workbench.

## 2.2. Requeriments previs

Aquest projecte es basa en els assajos duts a terme mitjançant l'eina Fluent que s'encarrega de la simulació del flux d'un fluid. Aquesta eina forma part del programa ANSYS Workbench.

En el Grau he treballat amb ANSYS en el curs de diferents assignatures. Tot i així al llarg d'aquest projecte he hagut d'ampliar el meu coneixement sobre aquest i s'han requerit moltes hores de feina abans d'aconseguir un domini suficient de les seves eines per tal d'extreure'n resultats i saber analitzar-los.



### 3. Introducció

Les ales invertides o alerons, han patit molts canvis al llarg de la història de l'automobilisme. Un canvi força innovador i revolucionari va ser l'àlep de Gurney. Tal com el seu nom indica el va inventar Daniel Sexton Gurney, un pilot de Fórmula 1 d'Estats Units que, l'any 1971, que va afegir un petit apèndix perpendicular a la superfície de l'aleró situat al final de la part superior d'aquest.

En un principi tot semblava indicar que aquest enginy no seria una millora aerodinàmica per a l'aleró, però els resultats dels estudis tan experimentals com teòrics revelen el contrari. Els alerons estan dissenyats per tal de generar sustentació negativa i és per aquest motiu que l'àlep de Gurney millora la seva aerodinàmica. Aquest apèndix fa augmentar la força de sustentació en una proporció molt més gran del que fa augmentar la força resistència a l'avanç.

#### 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal d'aquest projecte és aconseguir simular els efectes que provoca afegir l'àlep de Gurney a un aleró. Es pretén comparar els efectes provocats al flux d'aire pel perfil d'un aleró sense àlep i pel perfil d'un aleró amb àlep.

També són objectius importants:

- Aprofundir en els coneixements de la Mecànica de Fluids.
- Aprendre a utilitzar el software ANSYS Fluent per realitzar simulacions en 2D.
- Fer un estudi de sensibilitat de malla.
- Treballar amb diferents models de turbulència.
- Simular amb detall els efectes que l'àlep de Gurney causa en el flux d'aire.

## 3.2. Abast del projecte

El projecte que s'escriu a continuació es pot dividir en dues parts.

Una primera part teòrica on es defineixen certs aspectes de la Mecànica de Fluids que són necessaris per tal d'entendre els conceptes desenvolupats posteriorment.

I una segona part més extensa on es treballa amb l'ANSYS Workbench. Amb aquest programa es generarà la geometria de dos perfils diferents:

- Perfil NACA 63412.
- Perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney.

Es generarà un mallat per tal de poder simular-los amb l'eina Fluent imposant-hi unes certes condicions de contorn. Finalment s'analitzen i es comparen els resultats obtinguts de les simulacions dels dos perfils per tal de treure les conclusions finals del projecte.

És important mencionar el motiu per el qual s'ha escollit treballar amb el perfil NACA 63412. Per una banda, hi ha moltes bases de dades de perfils NACA de les quals es poden extreure coordenades i dades teòriques dels seus coeficients adimensionals per diferents angles d'atac. I per un altre banda, s'ha escollit el model 63412 pel fet de que tenia documentació relacionada d'un estudi experimental realitzat per un estudiant del RMIT University <sup>[1]</sup>.



## 4. Conceptes teòrics

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids encarregada de l'estudi de les accions que apareixen sobre els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i el fluid que l'envolta. Aquest projecte es centrarà en el comportament de l'aire, el fluid, al voltant d'un aleró i els efectes que aquest causa en el flux al variar el seu angle d'atac.

No es pot parlar d'aerodinàmica sense tenir en compte la importància de la geometria dels cossos que estan immersos en un fluid, ja que és la que definirà gran part del comportament d'aquest. És per això que quan ens referim a vehicles de competició parlem de cotxes amb un disseny molt aerodinàmic ja que, per aconseguir les màximes velocitats, és necessari que la resistència a l'avanç de la seva carrosseria sigui la mínima.

### 4.1. Una mica d'història

L'aerodinàmica no sempre ha tingut una gran importància en el disseny d'un vehicle. Inicialment els primers cotxes tenien una estructura molt diferent a la dels actuals ja que eren adaptacions dels cotxes de cavalls.



**Figura 3.** Renault Voiturette 1903

El disseny va anar evolucionant però els fabricants es van basar sobretot en la potència del vehicle. A mesura que s'augmentava la potència s'assolien velocitats més elevades i les característiques de la màquina es van haver d'anar adaptant a aquestes velocitats.

La aerodinàmica no va prendre un paper important fins que es va arribar a un punt en el que per molt que s'augmentés la potència, el vehicle no adquiria velocitats més elevades. A partir d'aquest moment es van començar a dur a terme canvis en la carrosseria encarats a millorar la resistència a l'avanç provocada per l'aire a grans velocitats.



Va ser l'any 1924 que Edmund Rumpler, un enginyer alemany, va decidir aplicar els seus coneixements d'aviació en un cotxe, deduint així que la forma aerodinàmica que menys resistència oferiria en contacte amb l'aire era la d'una gota d'aigua.



**Figura 4.** Tropfenwagen (cotxe gota)

Quan es va comprovar que amb una carrosseria més aerodinàmica es tenia una conseqüència directe en l'augment de la velocitat, els fabricants van fer evolucionar els dissenys dels seus models posteriors en aquest sentit, donant als seus vehicles uns perfils més afilats i no tant alts i robustos.

En competició aquests avanços van ser molt importants però l'augment de la velocitat va generar certs problemes en la conducció. Quan el vehicle passava per una corba del circuit, s'havia de disminuir la velocitat per tal de no perdre el contacte amb l'asfalt i conseqüentment es perdia temps.

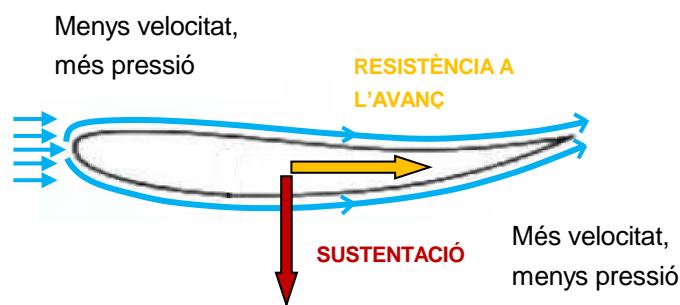
Era necessària una força capaç de mantenir el vehicle en contacte amb el terra sense tenir la necessitat de disminuir la velocitat extremadament. D'aquí surt un enginy que ha evolucionat molt al llarg de la història, **l'aleró**. Aquest té una geometria semblant a l'ala invertida d'un avió, però el seu disseny s'ha millorat per tal de proporcionar una sustentació negativa a la vegada que presenti poca resistència a l'avanç.

## 4.2. Els alerons

L'any 1956 Michael May, un enginyer suís i competidor amateur, va col·locar una ala invertida sobre de la cabina del seu vehicle. Per la seva geometria, aquest enginy proporcionava una sustentació negativa i impedia que el cotxe perdés el contacte amb l'asfalt a altes velocitats, però tot i així, no el van deixar competir al·ludint que obstaculitzaria la vista dels altres corredors.

No va ser fins l'any 1965 que el grup de carreres d'automòbils d'Estats Units 'Chaparral Cars' va introduir a la competició un vehicle amb un aleró, l'angle d'atac del qual era ajustable pel conductor [2].

Per comprendre l'aerodinàmica d'un aleró, és necessari fer un breu anàlisi de les forces que es donen en aquest degut a la seva geometria i al seu angle d'atac quan travessa un flux d'aire. Aquest anàlisi es pot observar a la Figura 3.



**Figura 3.** Descomposició de les forces sobre un aleró

A la Figura 3, es pot observar que el flux d'aire de la cara inferior anirà més ràpid que el flux de la cara superior. Això provocarà una depressió a la zona inferior del perfil i una pressió més elevada a la cara superior.

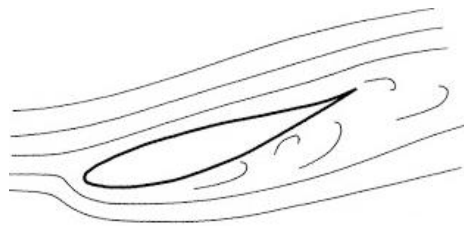
Aquest conjunt de successos es tradueixen en una força negativa anomenada "Força de sustentació" que és la que permet que el vehicle no perdi el contacte amb l'asfalt en certes situacions a altes velocitats. Pel fet d'avançar envoltat per un fluid també es dona la "Força de resistència a l'avanç" la qual s'oposa al moviment.

L'objectiu dels vehicles de competició és adquirir altes velocitats a qualsevol part del circuit, incloses les corbes. És per aquest motiu que interessa afegir alerons als automòbils ja que, tot i que generen una força de resistència a l'avanç, generen una força de sustentació negativa en una proporció molt més elevada.

Els alerons dissenyats per col·locar a la part posterior d'un vehicle de competició es poden fixar en diferents posicions per tal de proporcionar-li un cert angle d'atac.

A mesura que aquest angle d'atac és fa més elevat, tant la força de sustentació o Lift com la força de resistència a l'avanç o Drag, també augmenten.

Augmentar-lo en excés és contraproduent, ja que a partir d'un cert valor, la força de sustentació es redueix sobtadament. Això és degut a que el flux deixa de ser capaç de resseguir el perfil de l'aleró i es dona el que s'anomena "despreniment de la capa límit", fet que es pot observar en la Figura 4 i que s'explicarà amb més detall en les properes pàgines.

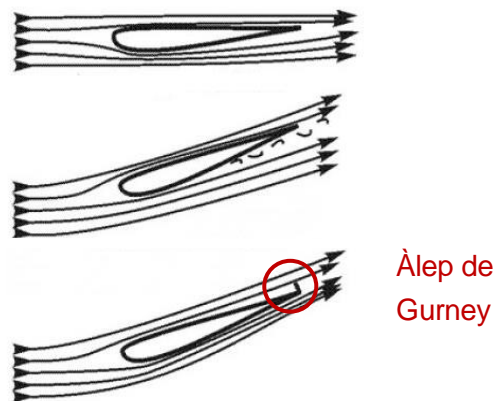


**Figura 4.** Despreniment de la capa límit al augmentar l'angle d'atac

### 4.3. L'àlep de Gurney

Els alerons han patit molts canvis al llarg del temps per tal de poder-los utilitzar en vehicles de competició. Un d'aquests canvis ha estat l'àlep de Gurney.

Aquest àlep consisteix en un petit apèndix situat a l'extrem de la superfície superior de l'aleró i perpendicular a aquesta. A primera vista és fàcil pensar que aquest enginy no millorarà l'aerodinàmica del perfil ja que l'aleró hauria d'estar dissenyat per tal de reduir la seva resistència a l'avanç i el fet d'afegir-hi l'àlep l'augmenta. No és fins que s'experimenta amb aquest invent que es revela que, tot i augmentar la resistència a l'avanç del perfil, aquest genera una major sustentació



**Figura 5.** Comportament del flux al voltant d'un perfil sense i amb l'àlep de Gurney

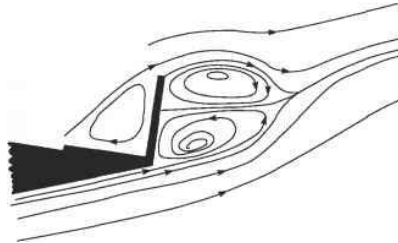
En la primera imatge de la Figura 5, podem observar el comportament d'un flux afectat només per la geometria del perfil.

En la segona imatge podem veure que quan el perfil adquireix un cert angle d'atac succeeix el desprendiment de la capa límit i es crea una estela al seu extrem posterior que perjudica l'eficiència de l'aleró, ja que s'incrementa la resistència amb l'aire i es disminueix la força de sustentació negativa.

En l'última de les imatges es pot observar l'àlep de Gurney que, a més a més d'augmentar la pressió en la part superior del aleró i de disminuir-la en la part inferior, genera una depressió a la seva part posterior. Aquest fet provoca que es doni una succió del flux cap a la superfície del perfil posposant així el desprendiment de la capa límit.

És per això que, tot i que s'augmenti la resistència a l'avanç, el fet de que el flux pugui recórrer tot el perfil sense desenganxar-se en angles d'atac superiors permetrà aconseguir valors de sustentació més elevats <sup>[3]</sup>.

Els estudis realitzats sobre els àleps de Gurney revelen que aquesta depressió generada a la part posterior de l'àlep és deguda a la formació de dos remolins que giren en sentit contrari. Es poden observar a la Figura 6.



**Figura 6.** Remolins provocats per l'àlep de Gurney

L'objectiu principal d'aquest projecte és demostrar l'efecte que té l'àlep de Gurney sobre el flux que recorre un perfil i simular aquests remolins.

## 4.4. Teoria aerodinàmica

Per comprendre el que es treballa en aquest projecte, es necessari realitzar un conjunt d'explicacions sobre els termes que es faran servir al llarg d'aquest.

### 4.4.1. Número de Reynolds

Una de les relacions més útils i conegudes en els estudis d'aerodinàmica és el número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (1)$$

On:

**$\rho$** : densitat del fluid ( $\text{Kg/m}^3$ )

**$V$** : velocitat del fluid ( $\text{m/s}$ )

**$L$** : longitud característica del cos a estudiar ( $\text{m}$ )

**$\mu$** : la viscositat dinàmica del fluid ( $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

El nombre de Reynolds no té unitats, és a dir, és un nombre adimensional. Indica la relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses exercides sobre un cos i ens dona informació sobre les característiques de les línies de corrent del flux que l'envolta.

Quan un fluid està altament influenciat per la viscositat, les seves línies de corrent són paral·leles i ordenades. A aquest tipus de flux se'l coneix com a **laminar** i correspon a nombres de Reynolds petits. En canvi, quan les línies de corrent d'un flux no són ordenades se l'anomena **turbulent** i es dona a nombres de Reynolds elevats.



**Figura 7.** Flux laminar i turbulent respectivament <sup>[4]</sup>

#### 4.4.2. Capa límit

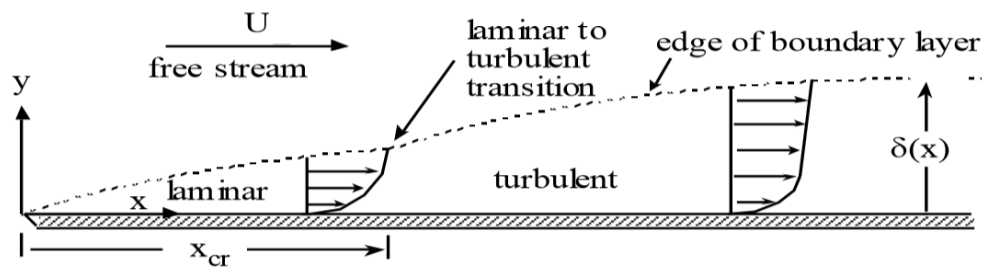
Suposem un cos movent-se a través d'un fluid a una velocitat  $V$ . Si agafem com a referència el cos, lluny d'aquest el fluid no es veu afectat per la seva presència i, per tant, té la mateixa velocitat  $V$ . En canvi, el fluid que està en contacte directe amb el cos, es queda enganxat a aquest per efectes de la viscositat, fet que implica que la seva velocitat relativa serà nul·la.

Els dos extrems no són un problema, les complicacions es troben en la zona intermèdia, és a dir, la zona en la que l'aire passa de tenir velocitat nul·la a la velocitat  $99\%V$  i en la que es dona l'augment de la velocitat del flux. Aquesta zona s'anomena **capa límit** <sup>[4]</sup>.

Existeixen dos tipus de capa límit:

- Capa límit laminar: el fluid es mou ordenadament.
- Capa límit turbulenta: el fluid es mou en totes direccions i es dissipa major energia. És una mica més ample que la capa límit laminar.

Fent la hipòtesi de placa plana de longitud  $L$  sotmesa a un flux de velocitat  $U$ , es poden fer diferents càlculs sobre la capa límit



**Figura 8.** Capa límit placa plana

Com es pot veure en la Figura 7, hi ha un punt de transició de capa límit laminar a capa límit turbulenta. Aquest punt es pot calcular a partir del Reynolds local crític ( $Re_{cr}$ ):

$$Re_{cr} = \frac{Ux_{cr}}{\nu} \quad (2)$$

On  $\nu$  és la viscositat cinemàtica ( $m^2/s$ ).

En la Figura 7 també es pot observar **el gruix de la capa límit  $\delta(x)$** . Aquest gruix es calcula mitjançant la hipòtesi de placa plana i depèn de si la capa límit és laminar o turbulenta.

- Capa límit laminar:

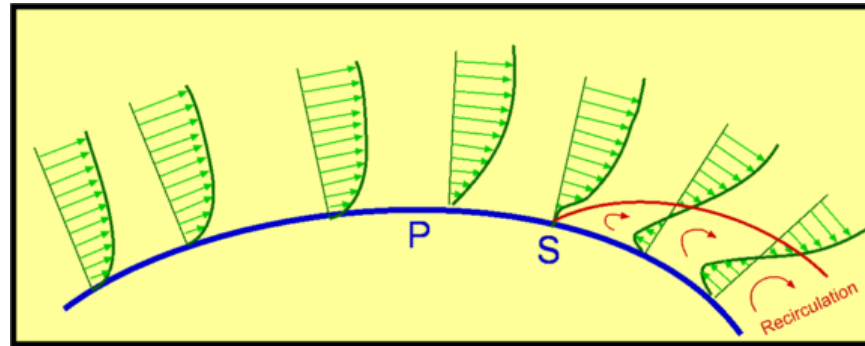
$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{5.0}{Re_x^{1/2}} \quad (3)$$

- Capa límit turbulenta:

$$\frac{\delta}{x} \approx \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad (4)$$

Una vegada explicats aquests conceptes sobre la capa límit, és important explicar el procés de separació d'aquesta, l'anomenat **despreniment de la capa límit**, ja que apareix bastantes vegades al llarg d'aquest projecte.

Quan un fluid envolta un perfil que avança a una certa velocitat, el flux d'aquest fluid es veu afectat per diferents gradients de pressions  $\left(\frac{dP}{dx}\right)$  generats per la geometria de la superfície de l'objecte.



**Figura 9.** Capa límit afectada per gradients de pressió

Aquests gradients poden ser favorables ( $\frac{dP}{dx} < 0$ ) o adversos ( $\frac{dP}{dx} > 0$ ) al moviment del flux. Si s'observa la Figura 8, es pot comprovar que fins al punt P, el gradient de pressió és favorable. En canvi, a partir d'aquest punt el gradient de pressió es advers i això implica una dissipació d'energia de les partícules de la capa límit que acaba generant la separació d'aquesta de la superfície del perfil.

Quan el flux no és capaç de resseguir la superfície del perfil i succeeix el desprendiment de la capa límit, aquest no té una velocitat definida i la pressió no es recupera. A la part posterior del cos es genera una estela que provoca resistència a l'avanç. Per tant, interessa posposar el màxim possible aquest desprendiment.

Quan s'estudia un problema en el que es fa la hipòtesi de que la capa límit no es desprèn, interessa que aquesta sigui tota laminar, és a dir, que no es doni la transició de capa límit laminar a turbulenta, ja que així s'aconsegueix un coeficient de fricció menor.

En canvi, en els casos en que sí que hi ha un desprendiment de la capa límit, com és el cas d'aquest projecte i de la majoria de casos, és important mantenir la capa límit el màxim temps adherida al perfil per tal de que el desprendiment es doni el més tard possible. En aquests casos s'ha comprovat que és millor que la transició de la capa límit laminar a capa límit turbulenta es doni el més aviat possible ja que, en la capa límit laminar al ser ordenada, el gradient de pressió advers sempre dissiparà energia a la mateixa partícula avançant així la separació. En canvi, en la capa límit turbulenta, es dona un moviment de partícules desordenat i, per tant, el gradient de pressió dissiparà energia a diferents partícules posposant el desprendiment.





**Figura 10.** Capa límit laminar i turbulenta abans de la separació respectivament [4]

En la Figura 9 es poden veure dues esferes, la de la primera imatge és llisa fet que posposa la transició de la capa límit laminar a capa límit turbulenta. En canvi, l'esfera de la segona imatge és rugosa i això avança la transició a capa límit turbulenta. Es pot comprovar visualment que la separació de la capa límit es dona abans en la primera imatge que a la segona.

#### 4.4.3. Coeficient de sustentació i de resistència a l'avanç

Com ha s'ha pogut observar a la Figura 3, hi ha dues forces bàsiques en les que es basa l'aerodinàmica d'un perfil. La força de resistència a l'avanç i la força de sustentació.

És important tenir en compte les component corresponents d'aquestes forces. La resistència a l'avanç té direcció paral·lela al moviment del perfil i sentit contrari a aquest. La de sustentació, en canvi, té direcció perpendicular al moviment i sentit positiu quan eleva el perfil i negatiu quan el fa baixar.

Aquestes forces es calculen mitjançant uns paràmetres adimensionals anomenats coeficient de resistència a l'avanç ( $C_D$ ) i coeficient de sustentació ( $C_L$ ) [4].

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho c^2 A} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho c^2 A} \quad (6)$$

On:

**$\rho$** : Densitat del fluid ( $\text{Kg/m}^3$ )

**$c$** : Velocitat del fluid ( $\text{m/s}$ )

**$A$** : Àrea de l'objecte ( $\text{m}^2$ )

**$D$** : Força de resistència a l'avanç (N)


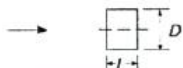
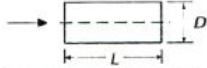

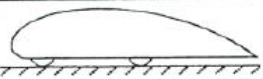

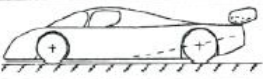
**$L$** : Força de sustentació (N)

**$C_D$** : Coeficient de resistència a l'avanç

**$C_L$** : Coeficient de sustentació

L'àrea de l'objecte depèn de la geometria d'aquest. En el cas de perfils com els alerons, amples i plans, és l'àrea de la forma en planta <sup>[4]</sup>.

Observant la Figura 11 es pot veure la relació entre les formes dels perfils i els seus coeficients aerodinàmics.

			$C_L$	$C_D$
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

**Figura 11.** Coeficients de sustentació i de resistència al aire de diferents perfils

Els quatre primers perfils no tenen sustentació degut a la seva geometria. El quart té el  $C_D$  més petit ja que al tenir la forma de gota és el que oposa menys resistència a l'avanç.

## 4.5. Tipus d'anàlisi

Teòricament es comença un estudi aerodinàmic amb un anàlisi computacional o anàlisi CFD (Computacional Fluid Dynamics). Un cop s'obtenen uns resultats que es consideren satisfactoris, es passa al nivell experimental, provant diversos prototips a escala mitjançant un túnel de vent o túnel aerodinàmic, per tal de comprovar el comportament del fluid al seu voltant. Per últim, es dissenya un prototip a escala real i es prova en les condicions d'ús. Si en algun d'aquests passos es fa un canvi en el model, s'ha de repetir el procediment des del principi.

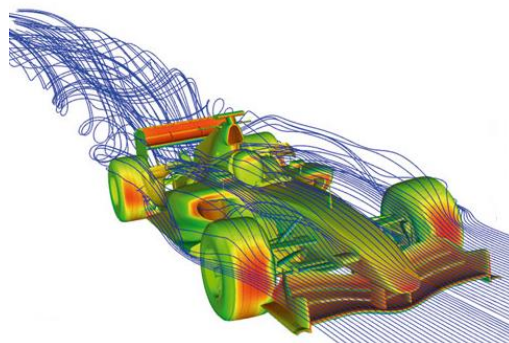
En aquest apartat s'explicarà breument el funcionament de l'anàlisi computacional de la dinàmica de fluids que és el tipus d'anàlisi amb el que es treballarà en aquest projecte.

### 4.5.1. Anàlisi computacional de la dinàmica de fluids (CFD)

L'anàlisi computacional de la dinàmica de fluids, és una eina informàtica que permet simular el comportament de camps fluids, transferència de calor i matèria.

L'ús d'aquesta eina s'ha fet cada cop més imprescindible a l'hora de fer estudis aerodinàmics ja que, comparat amb els assajos realitzats en túnels de vent, és un mètode molt més econòmic, pràctic i que aporta una quantitat elevada de resultats un cop convergeix el càlcul. A partir d'aquests resultats es pot obtenir de manera immediata les distribucions de forces, velocitats, línies de corrent, etc. del fluid que envolta el perfil.

El domini fluid a resoldre ha d'estar dividit en cel·les. Les equacions diferencials del problema les resol el programa usant tècniques matemàtiques com ara l'ús de volums finits duent a terme diferents iteracions que acaben convergint en una solució numèrica per a cada variable.



**Figura 12.** Estudi d'un vehicle en 3D mitjançant CFD

Aquesta eina es veu limitada, però, per la capacitat computacional dels microprocessadors que s'utilitzin. És per això, que tot i que sigui possible dissenyar malles de molts elements per tal d'aconseguir resultats més exactes, la velocitat de resolució del càlcul es veurà molt deteriorada. Per tant, la manera de treballar habitual és desenvolupant malles menys refinades que tinguin un error acceptable però que requereixin un temps de càlcul menor.

Com ja s'ha comentat anteriorment, l'eina de simulació que s'utilitza en aquest projecte es el software Fluent, que ve inclòs en el programa ANSYS Workbench. Aquesta eina utilitza les equacions RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) per tal de resoldre el problema. Aquestes equacions es basen en el comportament estadístic de l'estat de tots els paràmetres del flux turbulent com ara la velocitat o la pressió.

L'eina Fluent implementa els **models de turbulència** per tal de calcular els esforços turbulents juntament amb la resta d'equacions del fluid. En les equacions RANS els esforços turbulents es modelen amb la hipòtesi de Boussinesq, que suggereix que aquests esforços són proporcionals a la velocitat mitjana. El fet de treballar amb aquesta hipòtesi requereix determinar el valor de la viscositat turbulenta, que és una propietat del fluid i el seu valor s'ha d'iterar en cada punt considerat. Amb aquest objectiu s'han desenvolupat aquests models de turbulència.

En aquest projecte es treballa amb tres dels varis models de turbulència que Fluent té a l'abast:

- **Spallart – Allarmas:** és un model bastant simple que resol una sola equació de transport per la viscositat cinemàtica. És un model dissenyat sobretot per la caracterització de fluxos que envolten superfícies sòlides. En Fluent, aquest model s'utilitza per funcions de paret quan la malla no és suficientment fina. Per tant, es considera una de les millors eleccions per simulacions ordinàries.
- **K – èpsilon (K –  $\epsilon$ ):** és un model que resol dues equacions de transport, les variables de les quals són l'energia cinètica turbulenta i la dissipació turbulenta ( $\epsilon$ ). Aquesta segona variable és la que determina la magnitud de la turbulència. Aquest model és útil per a problemes amb gradients de pressió adversos relativament petits i per als fluxos propers a la paret.
- **K – omega (K –  $\omega$ ):** és un model que també resol dues equacions de transport, les variables de les quals són l'energia cinètica turbulenta i la dissipació específica ( $\omega$ ). Aquesta segona variable és la que determina la magnitud de la turbulència. Aquest model és útil per a fluxos lliures.

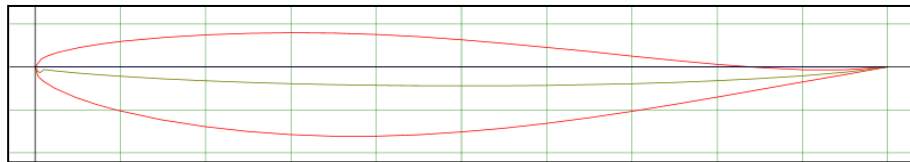


## 5. Estudi de la influència de l'àlep de Gurney

### 5.1. Objectius

L'objectiu principal d'aquest projecte és, tal com indica el títol d'aquest apartat, revelar la influència que té l'àlep de Gurney sobre la aerodinàmica d'un perfil.

Per assolir aquest objectiu es treballarà amb el perfil d'ala NACA 63412 col·locat de manera que actuï com a aleró, és a dir, que creï una força de sustentació negativa. Aquest perfil es pot observar en la següent figura.



**Figura 13.** Perfil NACA 63412 situat com a aleró

Primer es farà un estudi mitjançant l'anàlisi computacional de la dinàmica de fluids del perfil NACA sense l'àlep de Gurney i posteriorment, també usant CFD, se'n farà un altre afegint-hi l'enginy. D'aquesta manera es pretén comparar els resultats dels dos estudis per tal de demostrar la influència d'aquest àlep.

Per una altra banda, en aquest projecte també es vol aconseguir simular els remolins que es creen a la part posterior de l'àlep de Gurney, prèviament explicats a l'apartat 4.3, quan el perfil aerodinàmic avança envoltat per un fluid.

### 5.2. Metodologia

En aquest apartat s'explicarà la metodologia usada per dur a terme els dos estudis exposats a l'apartat anterior i les condicions de contorn que s'han considerat per resoldre els problemes.

S'ha treballat amb dos perfils mitjançant l'ANSYS Workbench, un és el NACA 63412 de 0.5m de corda i l'altre és el mateix model de NACA incloent-hi l'àlep de Gurney al final de la seva superfície superior.

Per a cada estudi s'han dut a terme diferents simulacions en les que s'han variat les condicions del problema, des de la geometria del perfil i la malla fins al model de turbulència usat. Per a cada anàlisi diferent, s'ha creat la geometria, s'ha generat la malla i s'ha fet la simulació mitjançant Fluent.

És important mencionar que al llarg d'aquest projecte, s'ha hagut d'aprendre a utilitzar les eines del programa ANSYS Workbench amb fluïdesa i, per aquest motiu, s'ha insistit en crear diferents malles per a la geometria del perfil per tal de fer un anàlisi de sensibilitat, és a dir, per tal d'assegurar que la malla no afecta als resultats obtinguts.

Com s'ha comentat en l'apartat 4.5.1, per fer les simulacions amb Fluent s'ha treballat amb tres models de turbulència: Spallart-Allarmas,  $K - \epsilon$  i  $K - \omega$ . Cada perfil ha estat analitzat pels següents angles d'incidència de la velocitat d'entrada:  $0^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$  i  $-20^\circ$ , aquests valors corresponen als angles d'atac positius del aleró.

Al llarg de tot aquest problema s'ha decidit treballar amb un nombre de Reynolds elevat,  $Re=1.3e6$ , que assegura un flux turbulent ja que l'aire ho és. Usant la fórmula del nombre de Reynolds (1), per una longitud de 0.5m de corda de l'aleró i la densitat i la viscositat dinàmica de l'aire ( $\rho=1.2 \text{ kg/m}^3$ ;  $\mu=1.8e-5 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$  °C), en resulta un valor de la velocitat d'entrada de 40m/s que equival a 144km/h. Aquesta velocitat s'ha considerat adequada per als estudis d'aquest projecte ja que és una velocitat prou elevada per a comprovar els efectes d'un aleró en el flux i, si es comprova la compressibilitat del fluid calculant el nombre de Mach amb aquesta velocitat:

$$M = \frac{V}{A} \quad (8)$$

On:

**V:** Velocitat del fluid (m/s)

**A:** Velocitat del so (en aire 344,2m/s)

$M=0.12 < 0.3$ , per tant, la velocitat de 40m/s no afecta a la compressibilitat.

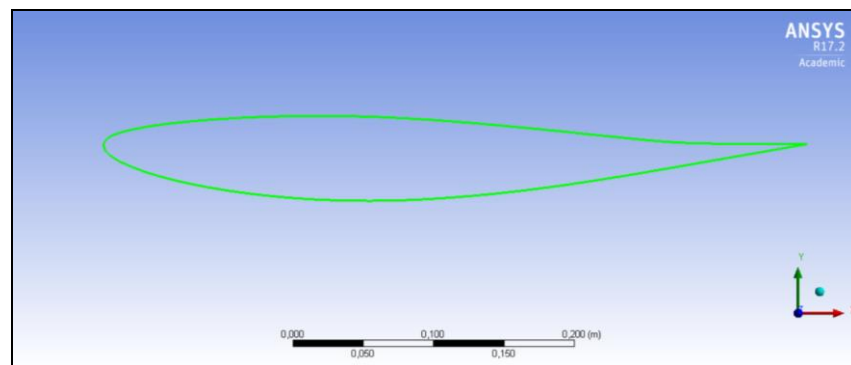
### 5.3. Estudi del perfil NACA 63412

En aquest apartat s'explicaran detalladament els passos que s'han seguit per fer l'estudi d'aquest perfil mitjançant el software utilitzat.

#### 5.3.1. Generació de la geometria

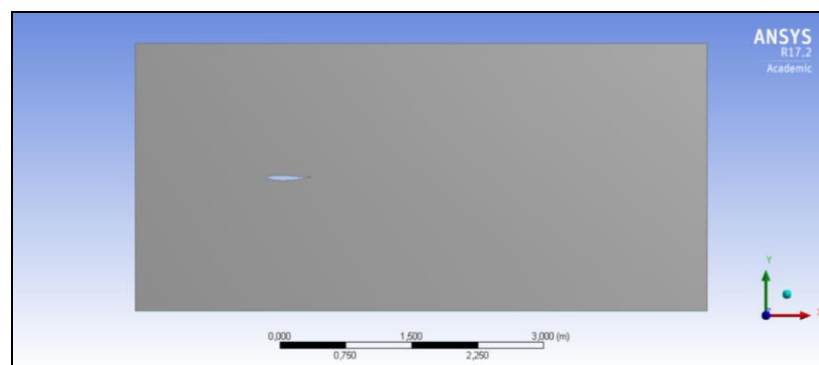
Per generar la geometria d'aquest perfil de 50 cm de longitud, s'ha adquirit d'una base de dades d'internet <sup>[5]</sup> dos fitxers de text que contenen les coordenades de 26 punts tant de la corba superior com de la inferior del perfil NACA 63412.

S'importen aquestes coordenades al arxiu de geometria amb el que treballa l'ANSYS Workbench i es generen les dues corbes, es visualitza el perfil de la següent manera.



**Figura 14.** Perfil NACA 63412

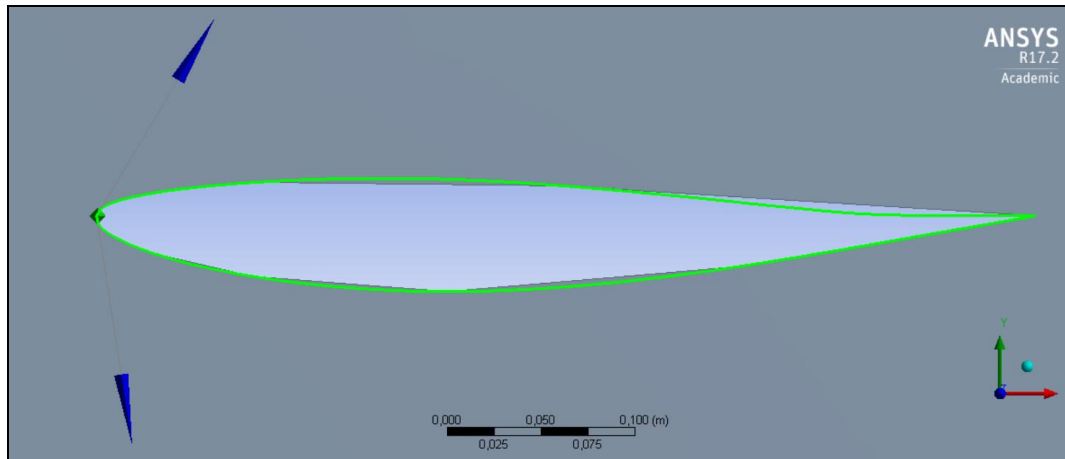
El software de Fluent, programa intern de l'ANSYS amb el que es duran a terme les simulacions, demana una superfície que representi el fluid que envolta el perfil. Per tant, s'ha generat una superfície externa suficientment gran com per poder visualitzar els efectes que aquest perfil produeix en el flux d'aire.



**Figura 15.** Superfície envoltant el perfil

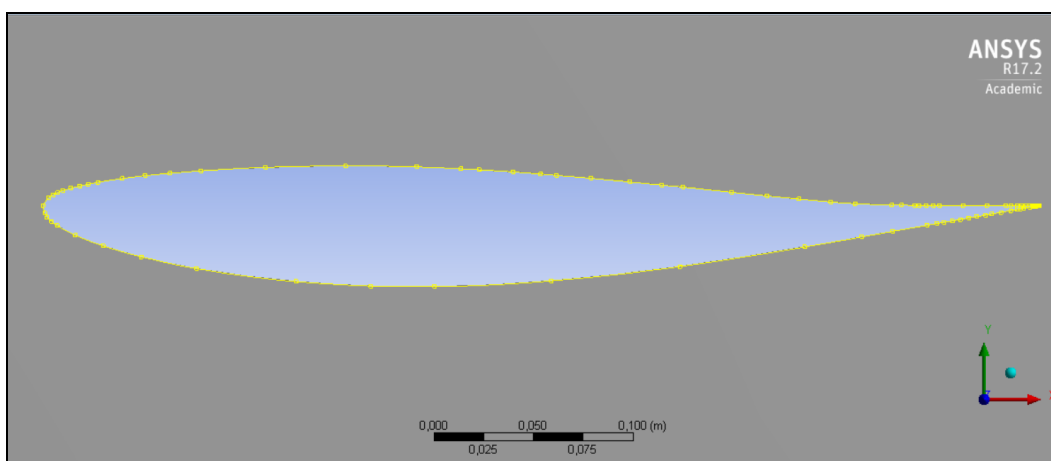


Una vegada generada aquesta superfície, però, sorgeix un problema. Tal com es pot observar a la Figura 16, tot i que les línies de perfil creades anteriorment semblen perfectes no ho són, ja que el programa no interpola la corba tant bé com seria necessari i quan es genera la superfície no és capaç de resseguir el perfil correctament.



**Figura 16.** Corbes del perfil mal interpolades

Per solucionar aquest error s'ha plantejat fer interpolacions per tal de trobar més punts de les corbes, però són necessaris molts càlculs per trobar suficients punts per tal de que la geometria s'ajusti correctament. És per això que s'ha optat per resseguir les corbes generades anteriorment mitjançant la eina draw spline que, treballant amb una quantitat considerable de zoom a la imatge, ha permès ajustar-les amb més precisió.



**Figura 17.** Corbes del perfil ajustades correctament

S'ha de tenir en compte que al ser un treball manual és fàcil haver comés errors que, tot i que visualment no es puguin apreciar en el perfil, destaquen quan es genera la malla.

S'ha treballat molt en el correcte ajustament de la part inicial i final del perfil. Si s'observa la Figura 17 es pot comprovar que hi ha una quantitat elevada de segments petits en aquestes zones. S'ha insistit en que la punta inicial fos el més arrodonida possible ja que, una punxa en el perfil, provocaria l'avançament del despreniment de la capa límit. Per una altra banda s'ha hagut de fer una aproximació a la part final de la geometria. S'ha fet un arrodoniment ínfim a la punta final per tal de que la malla fos capaç de fer una bona distribució d'elements en aquesta zona. Si no es fa aquesta aproximació, la malla adquireix una disposició molt basta.

També és important mencionar que per arribar al perfil que s'ha considerat òptim per a dur a terme els assajos, s'han hagut de fer varies geometries prèvies, set en concret, que destaquen per un mal ajustament de la geometria.

Una vegada aconseguit el perfil envoltat d'una superfície amb les corbes correctament ajustades, s'ha procedit a generar la malla.

### 5.3.2. Generació del mallat

Abans de generar la malla, s'ha donat el nom de 'velocity\_inlet' a totes les línies del contorn de la superfície rectangular que envolta el perfil. El software de Fluent reconeix aquest nom com a condició de contorn del problema.

Per tal de generar una malla suficientment optimitzada com per ser capaç de copsar tots els efectes produïts en el fluid al llarg de la simulació però sense ser excessiva com per alentir massa l'estudi, s'ha de començar per definir correctament la capa límit.

El primer pas és conèixer si la capa límit és laminar o turbulenta. Això es calcularà usant la fórmula (2) i suposant un  $Re_{cr}=10^5$  i  $\nu=10^{-5}$  a la velocitat de 40m/s. D'aquest càlcul en resulta un punt de transició de capa límit laminar a capa límit turbulenta  $x_{cr}= 0.025m$ . Com que  $x_{cr} \ll 0.5m$ , es considera que tota la capa límit del problema és turbulenta.

Una vegada es coneix el comportament de la capa límit, s'ha de calcular el gruix d'aquesta per tal d'ajustar la malla correctament. Fent servir la fórmula (4) a l'extrem del perfil,  $x=0.5m$ , s'obté un gruix igual màxim de  $\delta(x)=0.01071m$ .

Coneixent el gruix de la capa límit, es procedeix a calcular el valor de la primera cel·la al voltant del perfil. Aquest càlcul es duu a terme mitjançant la calculadora de la Figura 18 <sup>[6]</sup>.

**Y+ Wall Distance Estimation**

**Input**

Freestream velocity: 40 [m/s]  
 Density: 1.205 [kg/m³]  
 Dynamic viscosity: 1.82e-5 [kg/ms]  
 Boundary layer length: 0.5 [m]  
 Desired Y+ value: 1.0 []

**Output**

Reynolds number: 1.3e+6 []  
 Estimated wall distance: 8.9e-6 [m]

Estimate Wall Distance

En aquesta calculadora s'han introduït els següents valors:

- Velocitat del aire de 40 m/s. La viscositat i la densitat d'aquest tenen els valors de l'aire per defecte.
- La longitud de la corda del perfil de 0.5m.
- El valor de  $y^+ = 1$ . Per fer un estudi centrat en la capa límit.

**Figura 18.** Càlcul valor primera cel·la

Com s'observa a la Figura 18, els resultats de la calculadora són un nombre de Reynolds de  $1.3 \times 10^6$  i un valor per a la primera cel·la de  $8.9 \times 10^{-6}$  m.

Amb el valor de la primera cel·la s'ha creat un document Microsoft Excel per tal de calcular la quantitat de cel·les necessàries, amb diferents ratis de creixement, per cobrir tot el gruix de la capa límit, fet important per assegurar que la simulació té en compte tots els efectes que s'hi produeixen.

A partir d'aquest càlcul s'han generat varies malles amb diferents característiques per tal de trobar la que s'ajusta millor al problema. Al llarg d'aquest estudi s'han fet 8 mallats entre els quals s'han escollit 2 per dur a terme les simulacions.

S'han escollit dues malles amb unes característiques diferents per fer un estudi de sensibilitat. Aquestes s'expliquen a continuació.

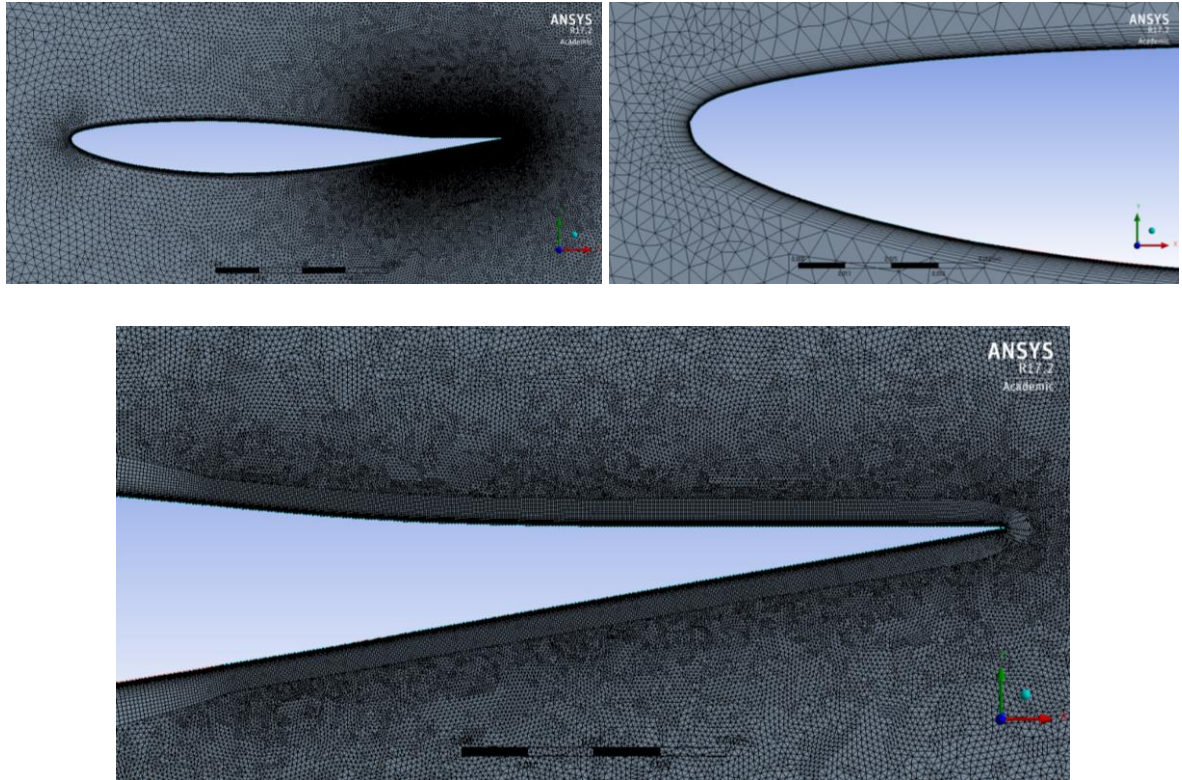
### **Malla 1**

Nombre d'elements: 203485

Aquesta malla s'ha creat inicialment fent un 'Inflation' per a totes les vores del perfil amb un valor de la primera cel·la en contacte amb aquest de  $1.1 \times 10^{-5}$  m, el qual és proper al imposat per  $y^+ = 1$ . Seguidament s'han imposat 27 files amb un radi de creixement de 1.2 per assegurar que aquesta primera regió de cel·les més petites és prou extensa com per englobar el total de la capa límit que es crearà per una velocitat de 40m/s.

Seguidament s'ha volgut generar una malla més refinada a la part posterior del perfil, ja que és on s'ha d'observar el desprendiment del flux. Per fer això s'ha generat un 'Sizing' només per a les vores de la part final del perfil imposant una mida d'element de  $3 \times 10^{-4}$  m i un radi de creixement de 1.02.

Una vegada completats aquets dos passos, el resultat és el que s'observa a la Figura 19.



**Figura 19.** Malla 1 perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney

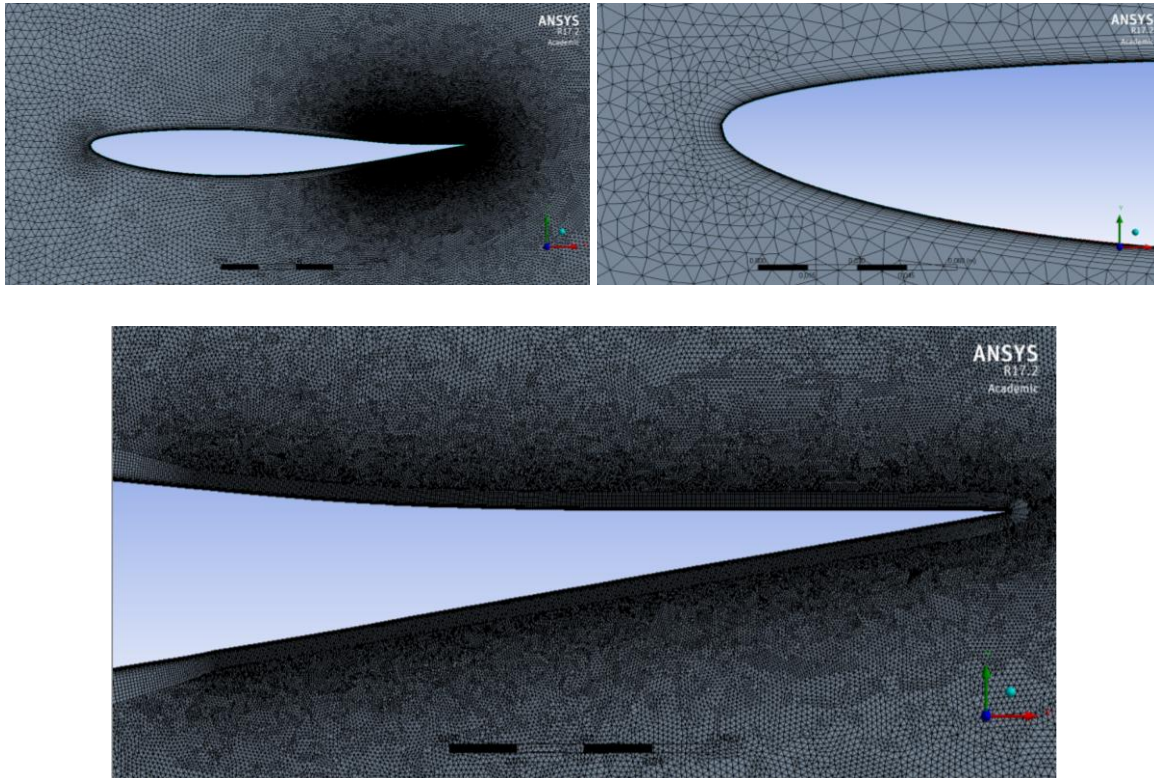
## **Malla 2**

Nombre d'elements: 250166

El 'Inflation' d'aquesta malla també s'ha considerat per a totes les vores del perfil amb un valor de la primera cel·la en contacte amb aquest de  $8.9 \times 10^{-6}$  m, el qual correspon a  $y^+ = 1$ . Seguidament s'han imposat 22 files amb un radi de creixement de 1.3 per assegurar que aquesta primera regió de cel·les més petites engloba tota la capa límit.

Seguidament també s'ha volgut refinar la malla a la part posterior del perfil. Per fer això s'ha generat un 'Sizing' només per a les vores de la part final del perfil imposant una mida d'element de  $2 \times 10^{-4}$  m i un radi de creixement de 1.02.

Una vegada completats aquets dos passos, el resultat és el que s'observa a la Figura 20.



**Figura 20.** Malla 2 perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney

Es pot observar que la malla 2 està una mica més refinada que la malla 1.

### 5.3.3. Simulacions

Les simulacions depenen de la quantitat d'elements que té la malla i del model de turbulència utilitzat. L'Spallart – Allarmas triga uns 7 minuts en fer convergir el càlcul, en canvi,  $k - \epsilon$  i  $k - \omega$  triguen uns 10 minuts aproximadament.

Com ja s'ha introduït anteriorment, s'han assajat les dues malles a diferents angles d'atac de l'ala i utilitzant tres models de turbulència per poder conèixer el comportament del fluid al voltant del perfil per a cadascun d'aquests. Per dur a terme aquests assajos no s'ha modificat l'angle d'atac del aleró sinó que s'ha variat l'angle d'incidència del vector velocitat, el qual pren els valors que s'exposen a la Taula 1.



Angle (°)	X	Y	Velocitat X	Velocitat Y
0	1	0	40	0
-2	0,9994	-0,0349	39,9756	-1,3960
-5	0,9962	-0,0872	39,8478	-3,4862
-10	0,9848	-0,1736	39,3923	-6,9459
-15	0,9659	-0,2588	38,6370	-10,3528
-20	0,9397	-0,3420	37,5877	-13,6808

Taula 1. Components de la velocitat

Per obtenir els valors del  $C_L$ , corresponent a la sustentació del aleró, i del  $C_D$ , corresponent a la resistència a l'avanç que aquest presenta, també s'ha de tenir en compte l'angle d'incidència de la velocitat. És per això que quan es defineixen aquests dos paràmetres s'han d'imposar els valors descrits a la Taula 2.

Angle (°)	Resistència		Sustentació	
	X	Y	X	Y
0	1	0	0	1
-2	0,9994	-0,0349	-0,0349	0,9994
-5	0,9962	-0,0872	-0,0872	0,9962
-10	0,9848	-0,1736	-0,1736	0,9848
-15	0,9659	-0,2588	-0,2588	0,9659
-20	0,9397	-0,3420	-0,3420	0,9397

Taula 2. Direccions dels components de resistència i sustentació

Passos per a definir la simulació amb Fluent:

1. **General:** escollir el temps estacionari. Els altres valors es deixen tal com estan per defecte ja que està tot seleccionat com interessa.
2. **Models:** s'escull Viscous – Laminar.
  - Spallart – Allarmas: es deixen les caselles marcades per defecte.
  - K –  $\epsilon$ : s'ha marcat la casella Standard i en el 'Near – Wall Treatment' s'ha escollit 'Enhanced Wall Treatment', que seria el més adequat per a un estudi intensiu de la capa límit.
  - K –  $\omega$ : s'ha marcat la casella SST ja que és el model que correspon a una  $y^+=1$ .
3. **Materials:** es tria l'aire com a fluid i es deixen els valors que hi ha per defecte.

4. **Boundary Conditions:** en aquest apartat s'han de definir les propietats de la condició 'velocity\_inlet'. S'ha d'indicar la magnitud (40m/s) i la direcció la qual dependrà de l'angle d'atac que s'hi estigui imposant.
5. **Reference Values:** són els valors de referència. S'ha d'indicar 'Compute from: velocity\_inlet' i comprovar que els valors són els correctes.
6. **Monitors:** s'han de monitoritzar el  $C_L$  i el  $C_D$  per tal de poder veure els seus valors.
7. **Initialization:** s'inicialitzen tots els valors des de la condició de 'velocity\_inlet' a partir dels quals es comença la simulació. Es marca la casella de 'Standard'.
8. **Run Calculation:** s'indica el nombre d'iteracions (a la majoria s'han fet 1000) de la simulació i es comença el càlcul.

S'ha fet una simulació per als angles de  $0^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$  i  $-20^\circ$  per a cadascun dels tres models de turbulència per les dues malles diferents i s'han anotat els seus resultats per analitzar-los posteriorment. Aquests resultats obtinguts d'aquesta primera part del projecte es prendran com a guia a l'hora de dur a terme l'estudi del perfil NACA 63412 afegint-hi l'àlep de Gurney.

## 5.4. Estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

Com s'ha comentat anteriorment, en aquest apartat s'explicaran detalladament els passos seguits per a fer la simulacions del perfil NACA 63412 afegint-hi l'àlep de Gurney per tal de veure els efectes que aquest provoca en el flux.

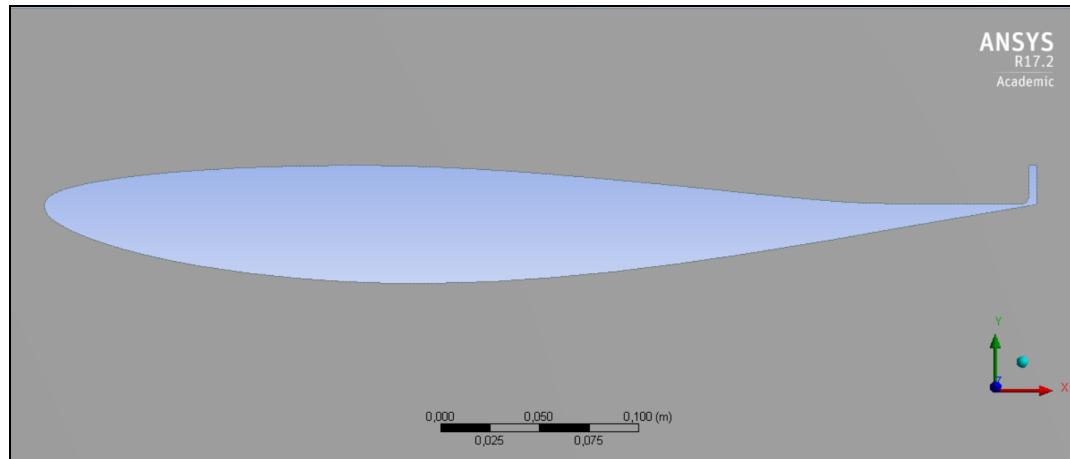
### 5.4.1. Generació de la geometria

Per generar la geometria del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney s'ha decidit que, per tal de que els resultats obtinguts de les seves simulacions es puguin comparar amb els obtinguts de les simulacions del perfil sense àlep, s'ha de basar en el disseny d'aquest.

És a dir, s'ha copiat l'arxiu del perfil NACA 63412 creat manualment per a fer l'estudi anterior i s'ha modificat afegint-li l'àlep de Gurney. Usualment aquest àlep té una alçada d'entre el 2% i el 4% de la longitud de la corda de l'aleró. En aquest cas s'ha considerat una alçada del 4% que correspon a 20 mm i s'ha pres una amplada de 4mm.

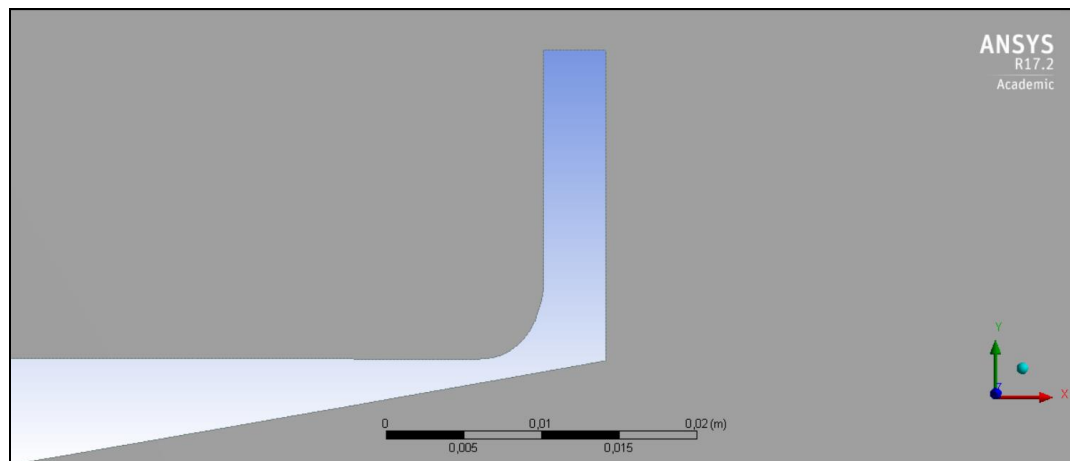
El disseny d'aquesta geometria també ha requerit varis intents abans d'aconseguir un resultat que permeti la generació d'una malla acceptable i unes simulacions que detectin els remolins que es generen a la part posterior de l'àlep.

Finalment, s'ha treballat amb la geometria que es pot veure en la Figura 21.



**Figura 21.** Perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

Durant el disseny del perfil s'ha insistit en que la unió entre la part superior de l'aleró i la part inferior del àlep no sigui gaire brusca per tal de generar un remolí a la part anterior del enginy que faciliti que el flux d'aire el superi.



**Figura 22.** Unió del àlep amb l'aleró



### 5.4.2. Generació del mallat

S'ha considerat que una malla adequada ha de ser prou refinada com per contemplar els efectes que l'àlep provoca en el flux d'aire, però amb un nombre d'elements que permetin dur a terme les simulacions sense alentir extremadament el procés.

La generació del mallat per aquest perfil s'ha basat en les dues malles de l'estudi del perfil sense àlep. És a dir, com s'ha calculat en l'apartat 5.3.2, s'ha considerat que tota la capa límit és turbulenta i que el gruix màxim d'aquesta és igual a  $\delta(x)=0.01071\text{m}$ . A partir d'aquests càlculs s'ha generat la malla utilitzada en aquest estudi però no ha sigut un disseny directe ja que s'ha hagut de retrocedir diverses vegades a la generació de la geometria per tal d'adequar el perfil i aconseguir una malla sense canvis significatius i una distribució d'elements ajustada al perfil. Abans d'arribar a la geometria exposada anteriorment i a la malla amb la que s'ha treballat, s'han fet 8 intents.

La malla resultant té un nombre d'elements que es troba entremig del de les dues malles del perfil sense àlep.

#### **Malla**

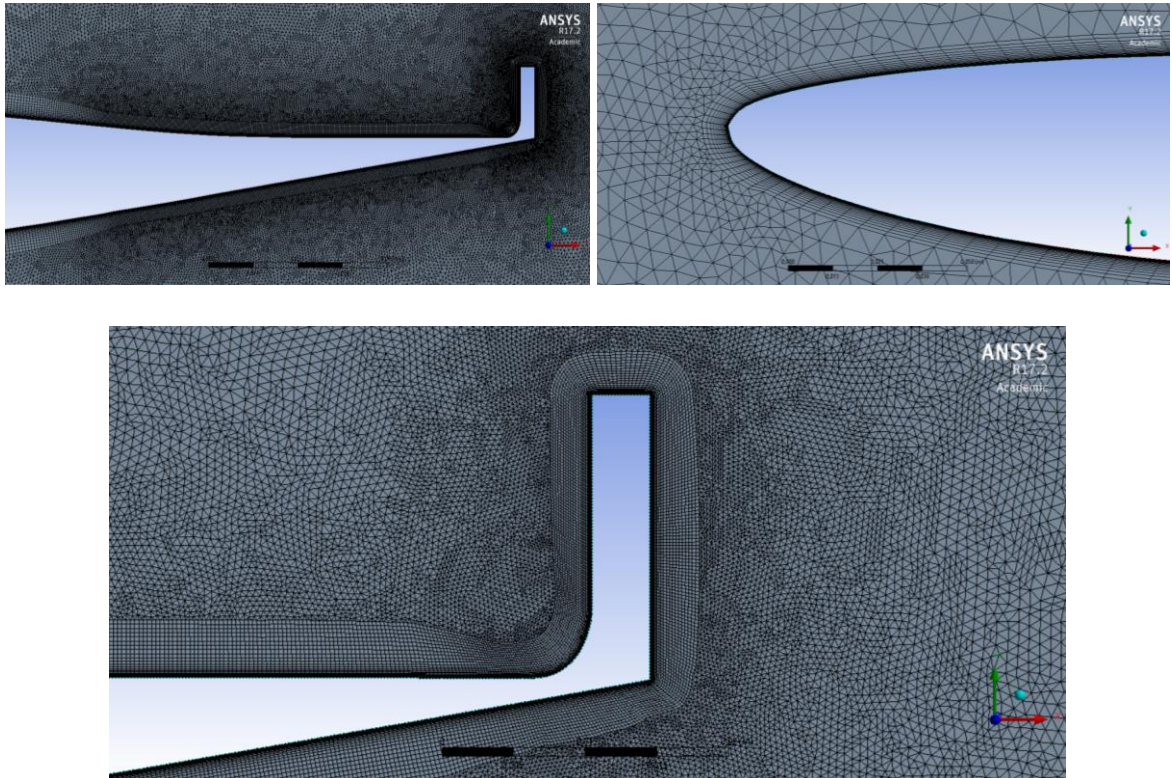
Nombre d'elements: 230073

Aquesta malla s'ha creat inicialment fent un 'Inflation' per a totes les vores del perfil amb un valor de la primera cel·la en contacte amb aquest de  $1.1 \times 10^{-5} \text{ m}$ , el qual és proper al imposat per  $y^+ = 1$ . Seguidament s'han imposat 27 files amb un radi de creixement de 1.2 per assegurar que aquesta primera regió de cel·les més petites és prou extensa com per englobar el total de la capa límit que es crearà per una velocitat de 40m/s. Aquesta base de la malla és igual a base de la Malla 1 del perfil sense àlep ja que aquesta és prou fina i s'ha demostrat que engloba perfectament la capa límit.

Seguidament s'ha volgut generar una malla més refinada a la part posterior del perfil, ja que és on s'ha d'observar el desprendiment del flux. Per fer això s'ha generat un 'Sizing' només per a les vores de la part final del perfil però sense incloure les del àlep de Gurney imposant una mida d'element de  $3 \times 10^{-4} \text{ m}$  i un radi de creixement de 1.02.

Per acabar de completar aquesta malla, s'ha generat un segon 'Sizing' de les línies que dibuixen l'àlep de Gurney una mica més fi que l'anterior, ja que es pretén simular tot un seguit de successos a la part posterior d'aquest que tenen dimensions molt petites. Aquest 'Sizing' consisteix en una mida d'element de  $2 \times 10^{-4}$  i un rati de creixement del 1.02.

Una vegada completats aquets tres passos, el resultat és el que s'observa a la Figura 23.



**Figura 23.** Malla perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

### 5.4.3. Simulacions

Les simulacions depenen de la quantitat d'elements que té la malla i del model de turbulència utilitzat. En aquest estudi L'Spallart – Allarmas triga uns 10 minuts en fer convergir el càlcul, en canvi,  $k - \epsilon$  i  $k - \omega$  triguen uns 15 minuts aproximadament.

En aquesta segon estudi del projecte, les simulacions s'han fet de la mateixa manera que el primer estudi.

S'han utilitzats els mateixos tres models de turbulència amb les mateixes condicions i s'han fet assajos pels angles d'atac de  $0^\circ$ ,  $-2^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $-10^\circ$ ,  $-15^\circ$  i  $-20^\circ$ . S'han anotat els resultats per a analitzar-los posteriorment i poder comparar-los amb els valors obtinguts per als assajos del perfil NACA sense àlep de Gurney.



## 6. Anàlisi de resultats

### 6.1. Introducció

En aquest apartat s'analitzaran els resultats de les simulacions que s'han dut a terme al llarg del projecte en l'ordre que s'exposa a continuació.

- S'estudiaran els resultats que s'obtenen dels assajos del perfil NACA 63412 sense l'àlep de Gurney.
- S'analitzaran els resultats obtinguts de les simulacions del perfil NACA 63412 amb l'àlep de Gurney.
- Es farà una comparativa dels resultats obtinguts dels dos perfils.

### 6.2. Resultats del estudi del perfil NACA 63412

Com s'ha comentat en apartats anteriors, aquest estudi s'ha dut a terme usant tres models de turbulència diferents imposant-los a dues malles amb un nombre d'elements distints i a angles d'atac diferents.

S'ha iniciat fent assajos amb el model de turbulència més senzill, el Spallart – Allarmas.

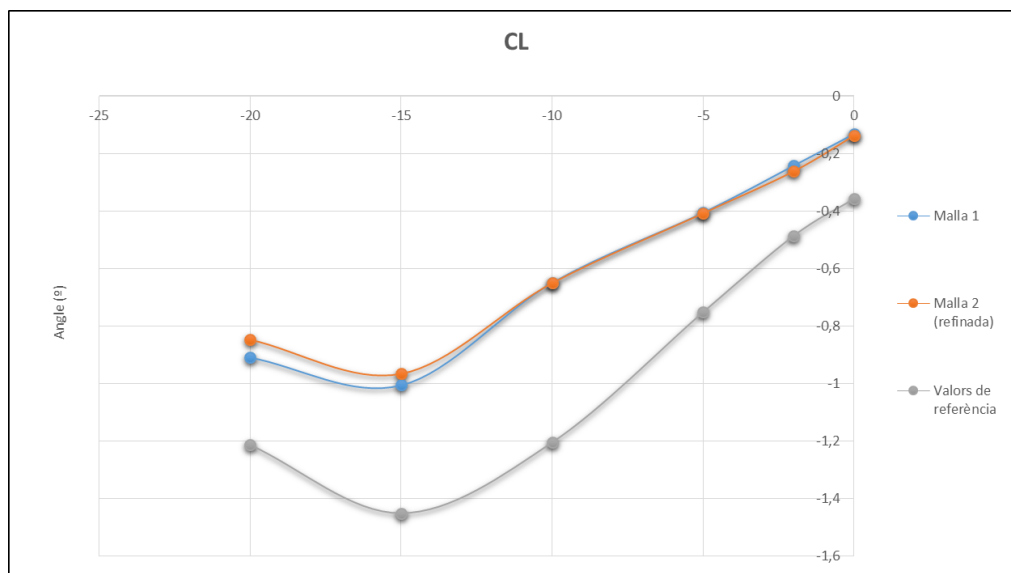
#### 6.2.1. Estudi amb Spallart - Allarmas

D'aquest model per les dues malles diferents s'obtenen la taula i els gràfics següents:

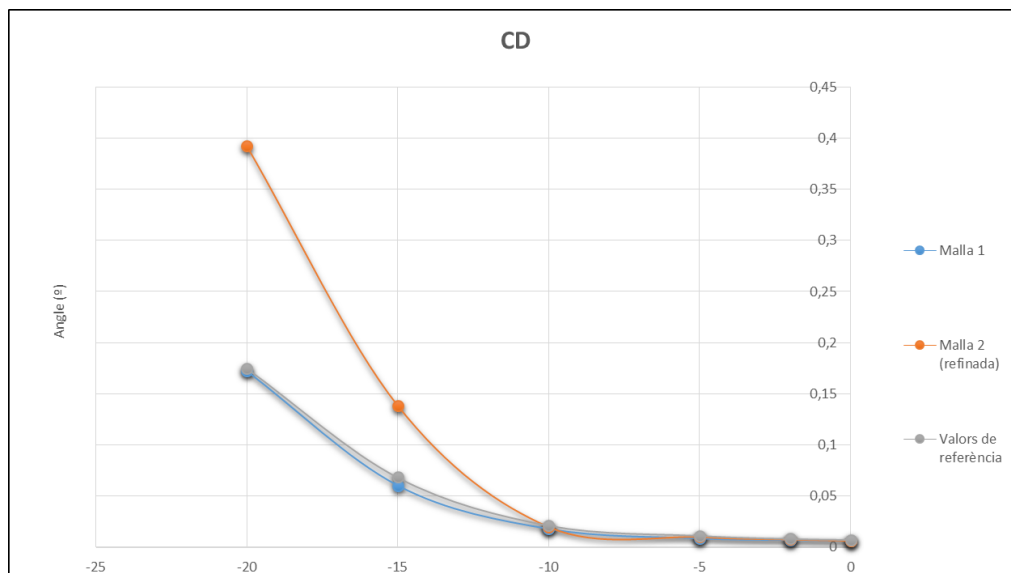
NACA 63412						
Spallart - Allarmas						
Angle (°)	Malla 1		Malla 2 (refinada)		Valors de referència	
	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
0	-0,1321	0,0059	-0,1371	0,0063	-0,3561	0,0071
-2	-0,2422	0,0067	-0,2611	0,0075	-0,4851	0,0081
-5	-0,4057	0,0083	-0,4074	0,0099	-0,7511	0,0111
-10	-0,6497	0,0176	-0,6503	0,0198	-1,2051	0,0211
-15	-1,0054	0,0601	-0,9654	0,1385	-1,4511	0,0682
-20	-0,9088	0,1723	-0,8464	0,3926	-1,2131	0,1751

**Taula 3.** Resultats Spallart – Allarmas per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials

Aquests valors de referència que es veuen en la taula s'han extret de la mateixa base de dades de la que s'han adquirit els arxius de text de les coordenades del perfil NACA 63412 [5]. Aquesta pàgina d'internet les dades de la majoria de perfils NACA. S'ha fet servir com a una guia comparativa per assegurar que els valors obtinguts són coherents.



**Gràfic 1.** Resultats Spallart – Allarmes del coeficient de sustentació



**Gràfic 2.** Resultats Spallart – Allarmes del coeficient de resistència a l'avanç

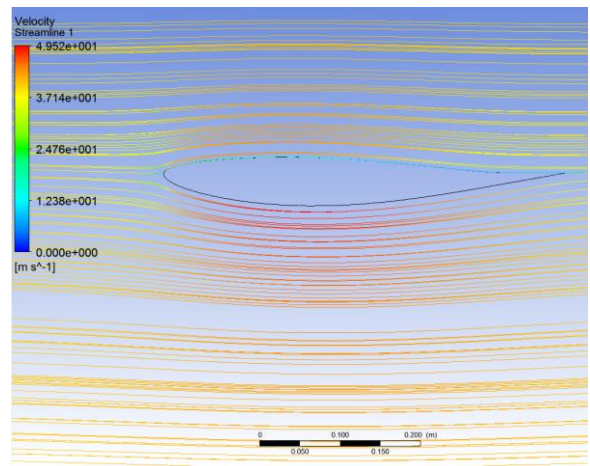
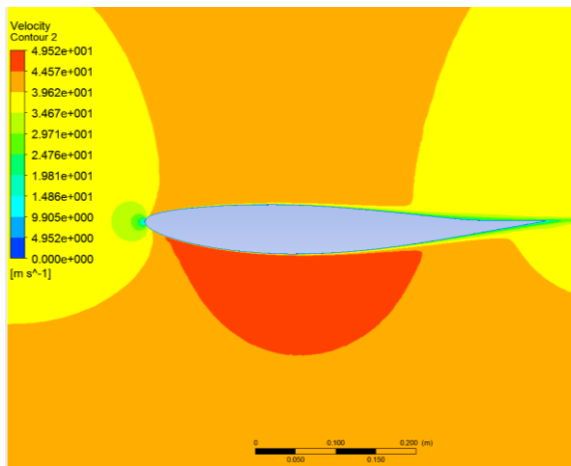
Com es pot observar en el gràfic 1 del coeficient de sustentació les corbes obtingudes per les dues malles són molts semblants entre elles i s'acosten prou a la dels valors comparatius.

Pel gràfic 2 del coeficient de resistència a l'avanç es pot veure que la malla 1 es manté pràcticament igual a la de valors de referència. Per tant, per a aquest model de turbulència es considera que la malla 1, la més senzilla, és la més adequada.

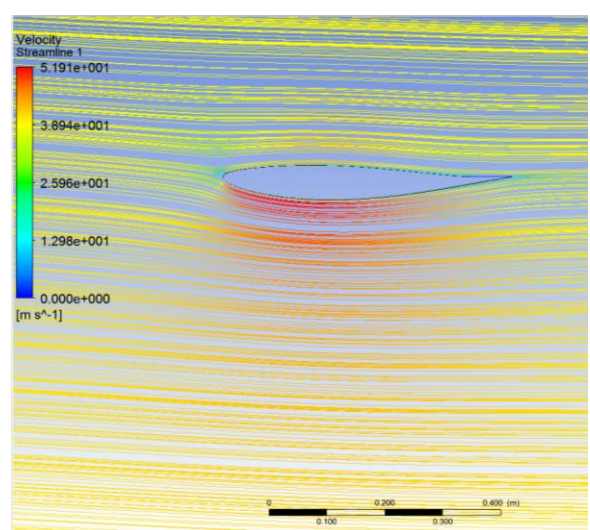
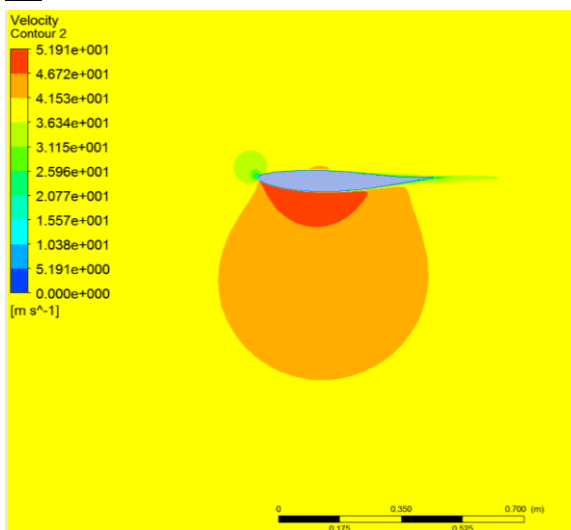
A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència i les dues malles diferents.

## Malla 1

**0°**

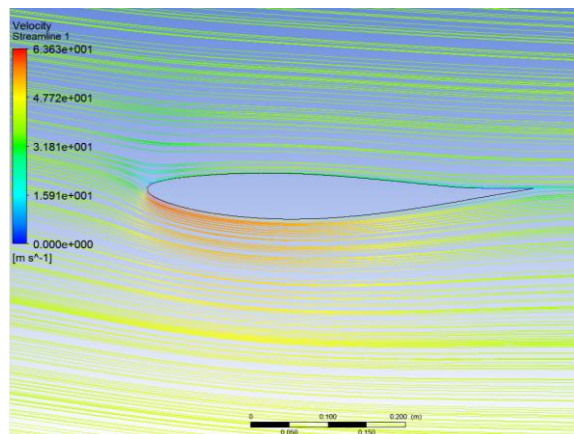
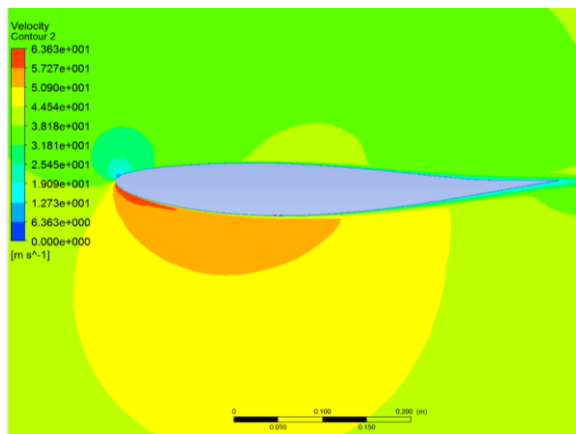


**-2°**

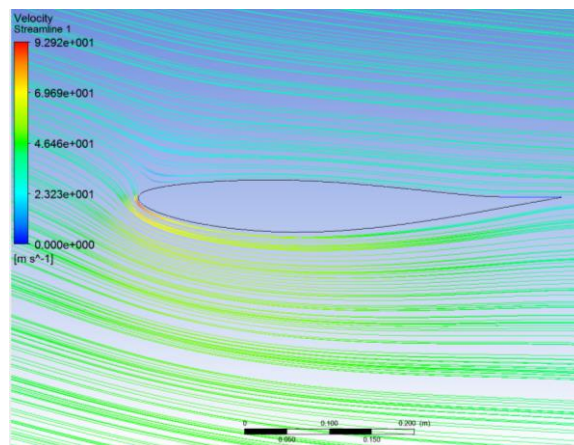
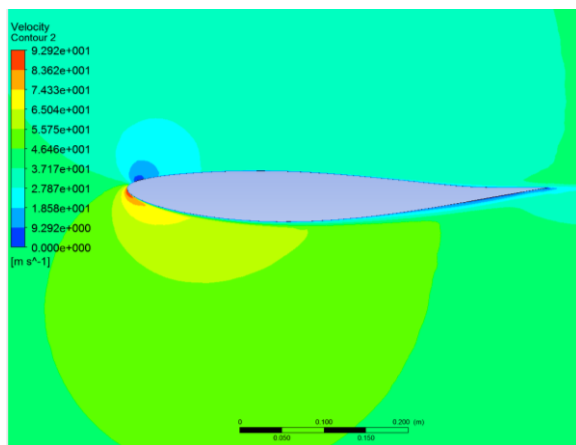




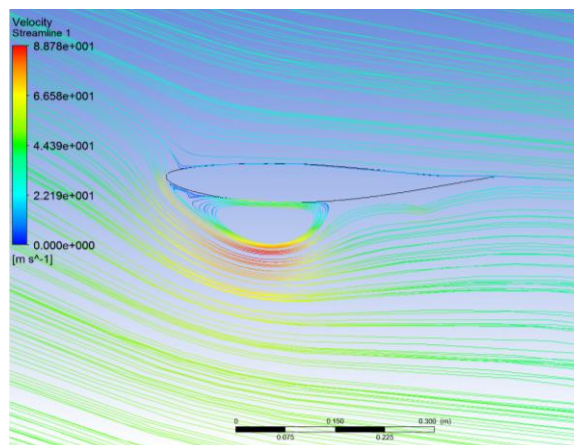
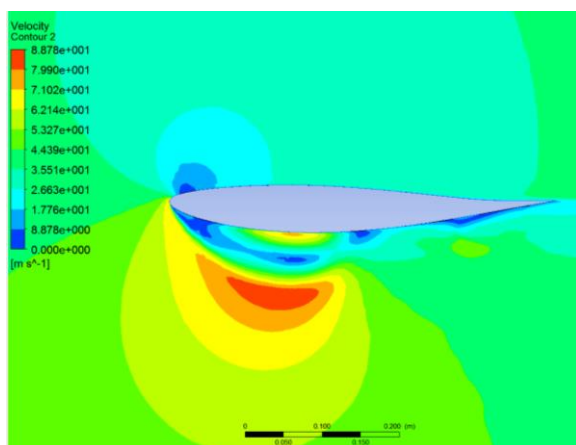
**-5°**

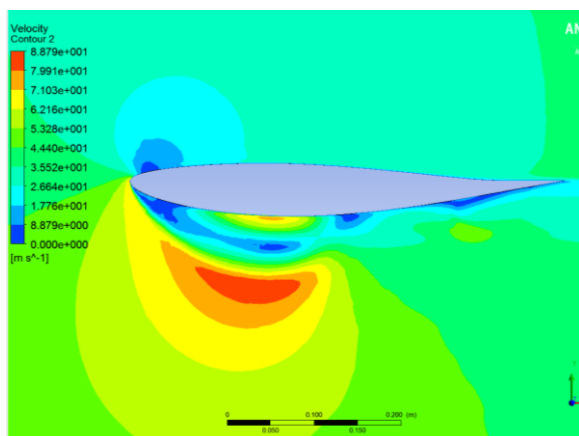


**-10°**

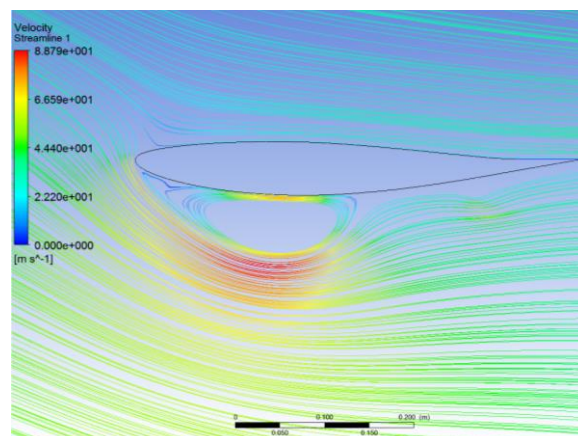


**-15°**



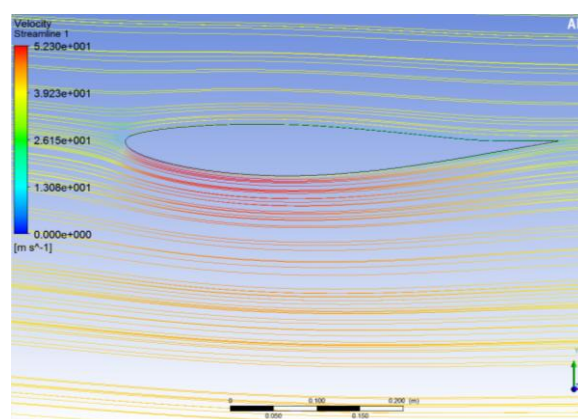
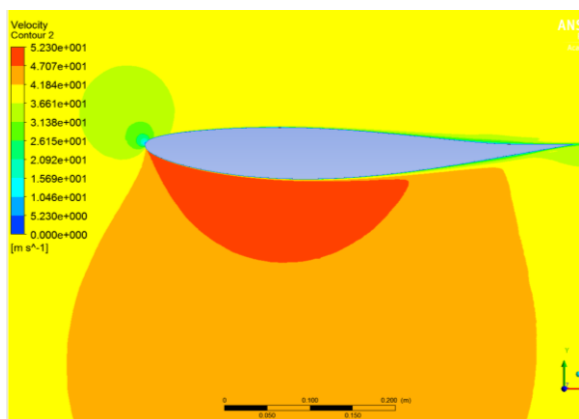
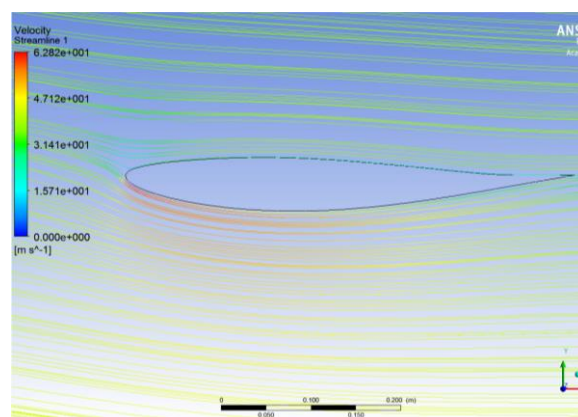
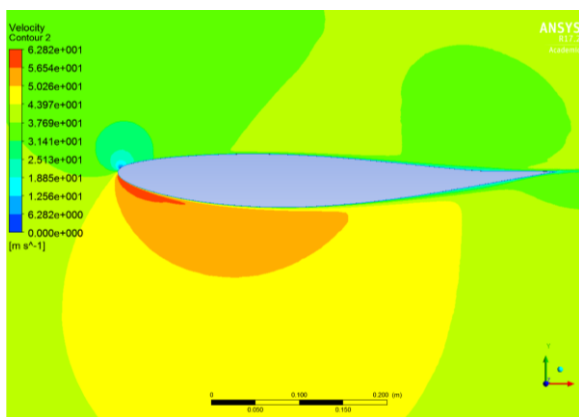
**-20°**

**Figura 24.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allmaras per la malla 1 de 0° a -20°



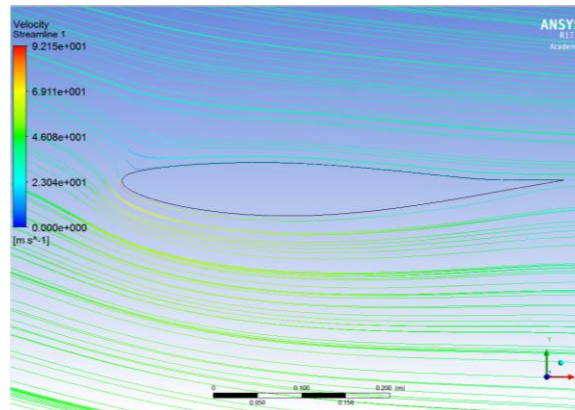
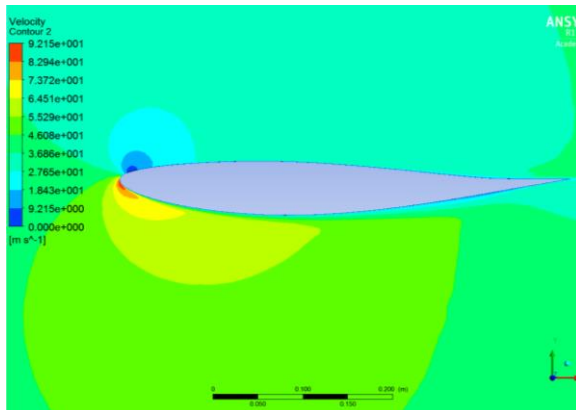
**Figura 25.** Línies de corrent del model de Spallart – Allmaras per la malla 1 de 0° a -20°

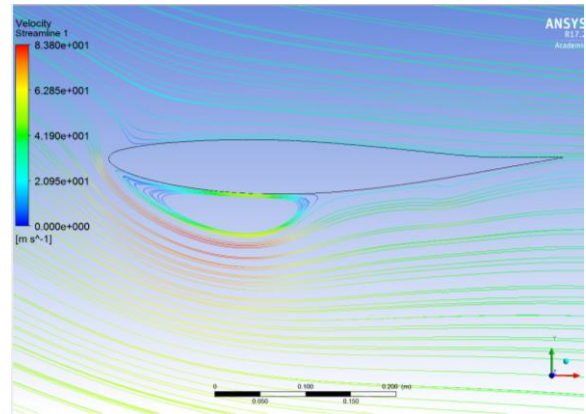
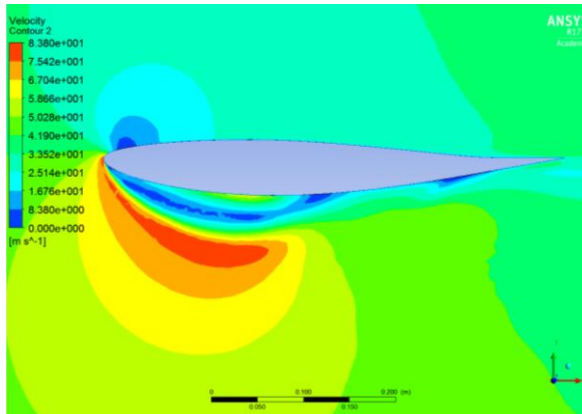
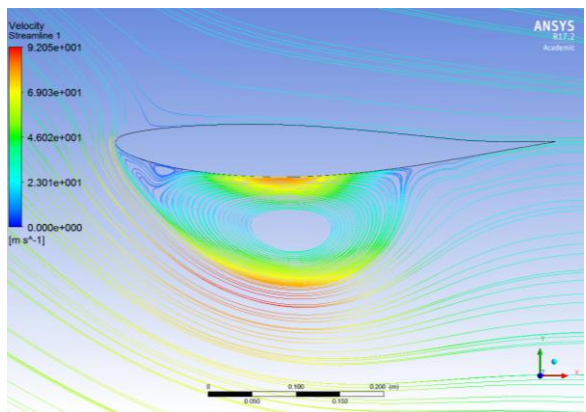
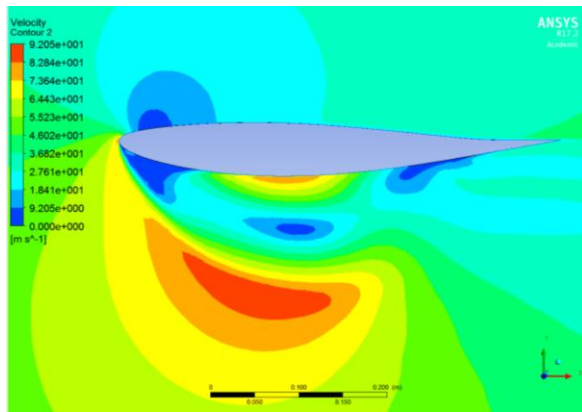
## **Malla 2**

**-2°****-5°**



**-10°**



**-15°****-20°**

**Figura 26.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allarmas per la malla 2 de 0° a -20°

**Figura 27.** Línies de corrent del model de Spallart – Allarmas per la malla 2 de 0° a -20°

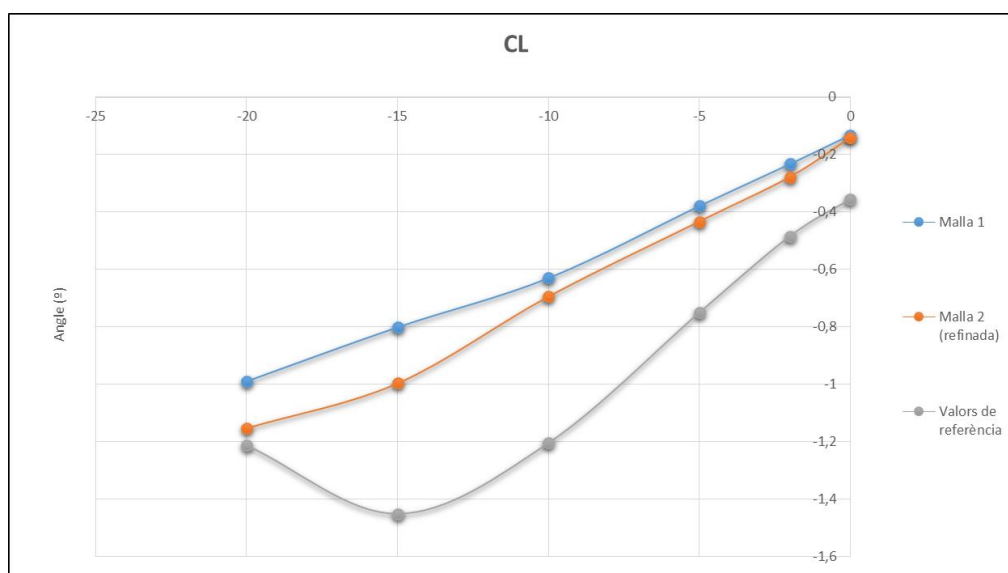
En els gràfics dels coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç es pot veure que el despreniment es dona entre els 10° i els 15°. En les imatges dels contorns de velocitat i les línies de corrent es pot comprovar que aquest fet també succeeix entre aquests graus.

### 6.2.2. Estudi amb $K - \epsilon$

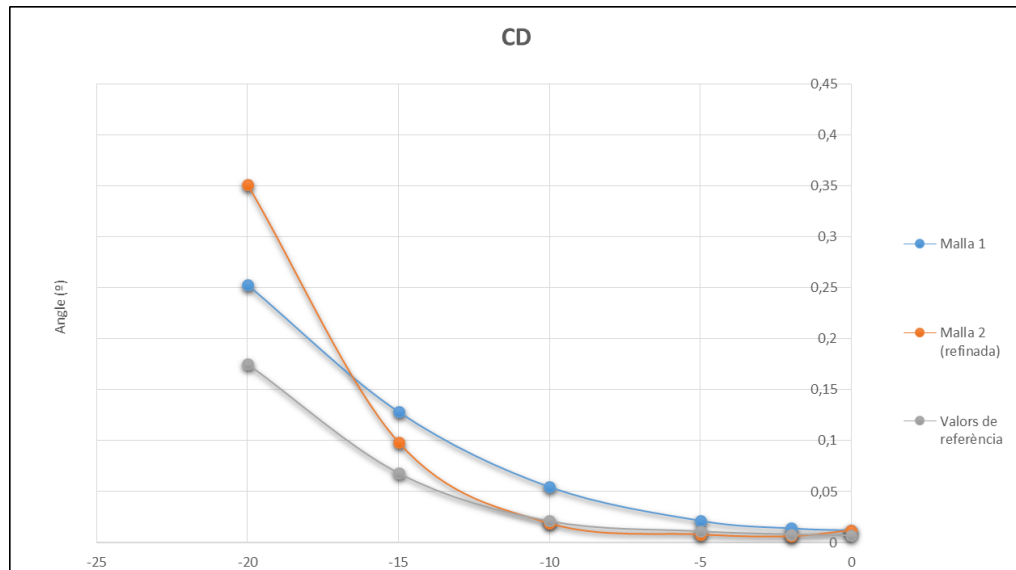
D'aquest model per les dues malles diferents s'obtenen la taula i els gràfics següents:

NACA 63412						
K - $\epsilon$						
Angle (°)	Malla 1		Malla 2 (refinada)		Valors de referència	
	$C_L$	$C_D$	$C_L$	$C_D$	$C_L$	$C_D$
0	-0,1331	0,0121	-0,1428	0,0123	-0,3561	0,0071
-2	-0,2335	0,0142	-0,2791	0,0064	-0,4851	0,0081
-5	-0,3799	0,0217	-0,4341	0,0081	-0,7511	0,0111
-10	-0,6305	0,0548	-0,6951	0,0191	-1,2051	0,0211
-15	-0,8015	0,1284	-0,9967	0,0985	-1,4511	0,0682
-20	-0,9896	0,2528	-1,1527	0,3509	-1,2131	0,1751

**Taula 4.** Resultats K -  $\epsilon$  per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials



**Gràfic 3.** Resultats K -  $\epsilon$  del coeficient de sustentació



**Gràfic 4.** Resultats K –  $\epsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç

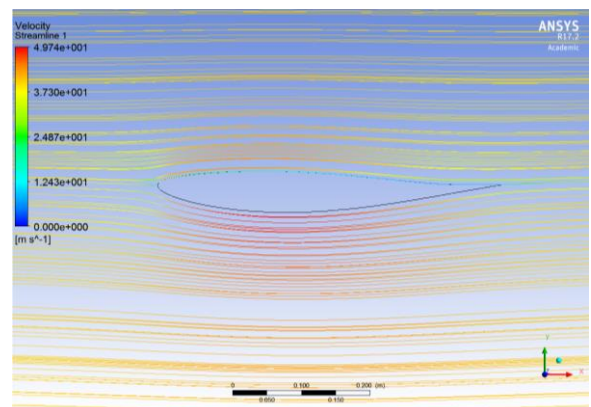
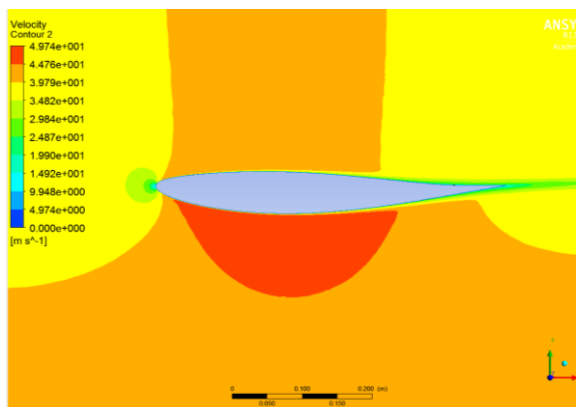
A partir dels valors dels coeficients de sustentació i resistència a l'avanç, es pot dir que aquest model no detecta un desprendiment clar de la capa límit.

La recta de valors de referència pel coeficient de sustentació ens indica que aquest desprendiment es dona entre els 10° i els 15° d'angle d'atac de l'aleró, i els valors obtinguts revelen que la malla 1 no presenta aquest desprendiment i que la malla 2 detecta una petita variació en la sustentació però no es veu una clara davallada d'aquesta.

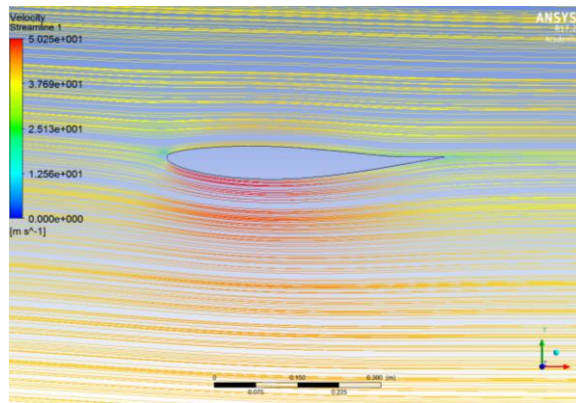
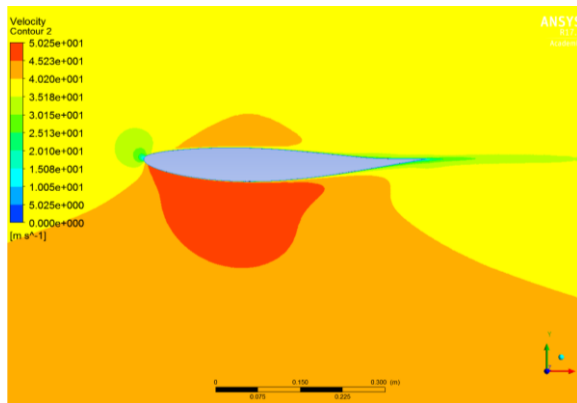
A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència i les dues malles diferents.

### Malla 1

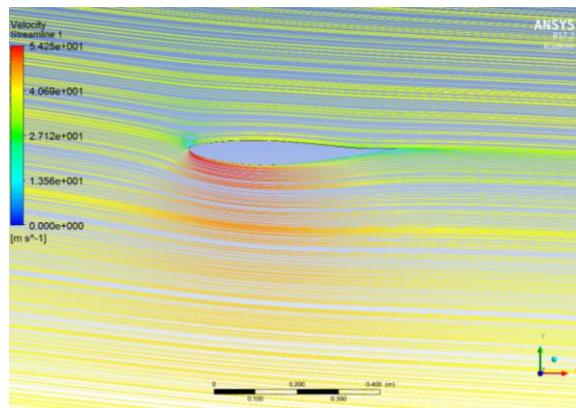
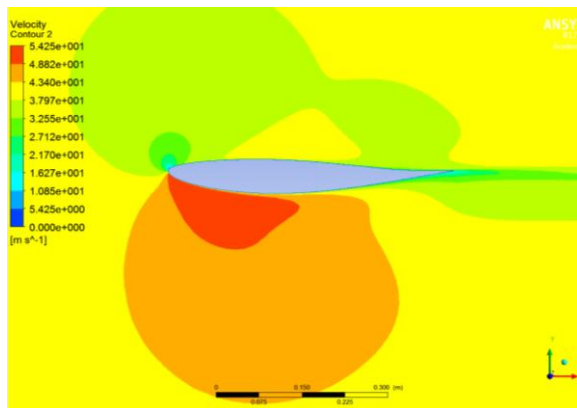
0°



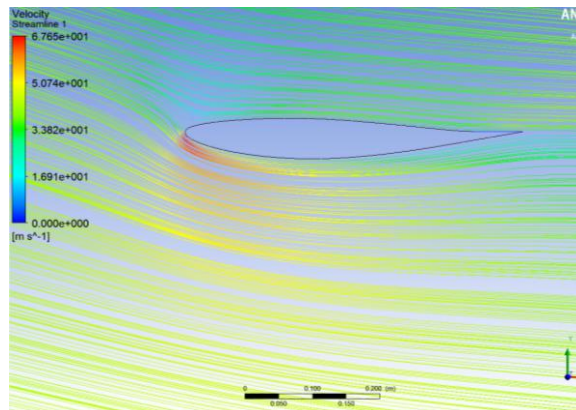
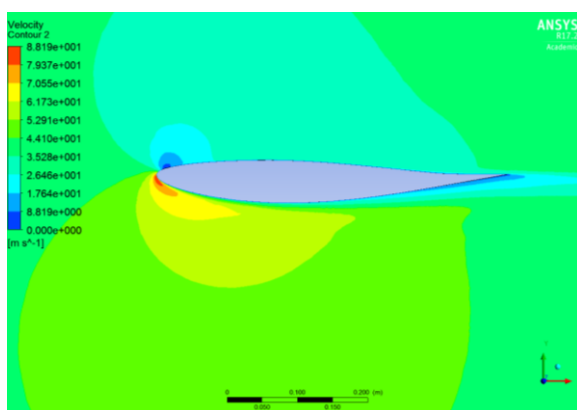
**-2°**



**-5°**

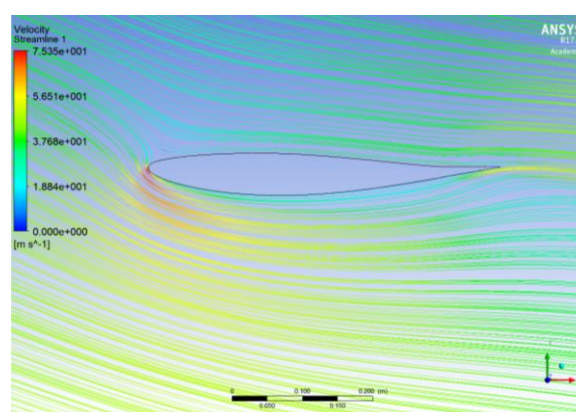
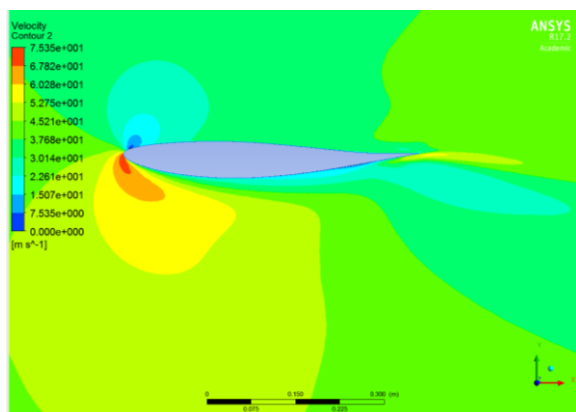


**-10°**

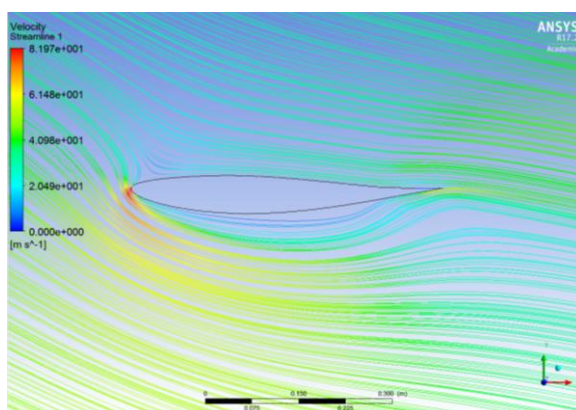
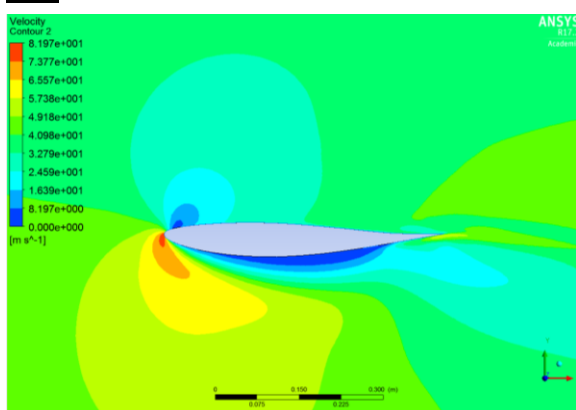




**-15°**



**-20°**

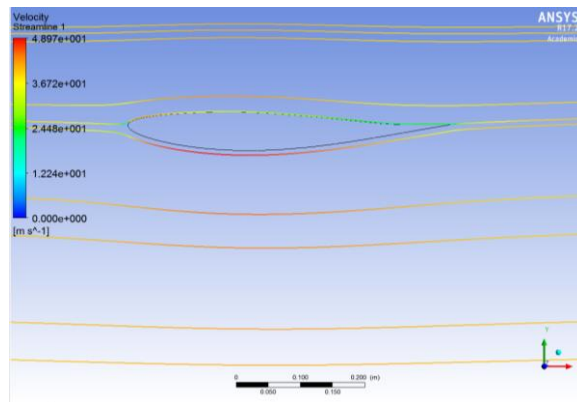
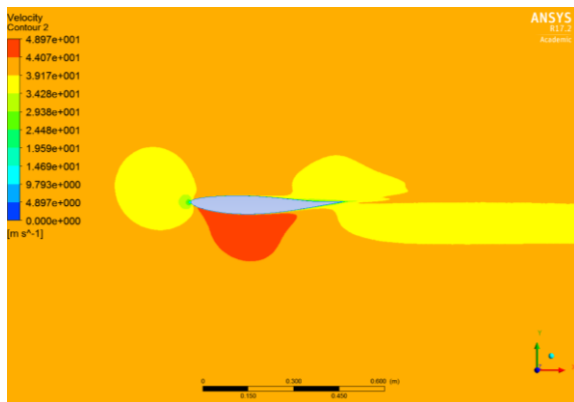


**Figura 28.** Contorns de velocitat del model de  $K - \epsilon$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

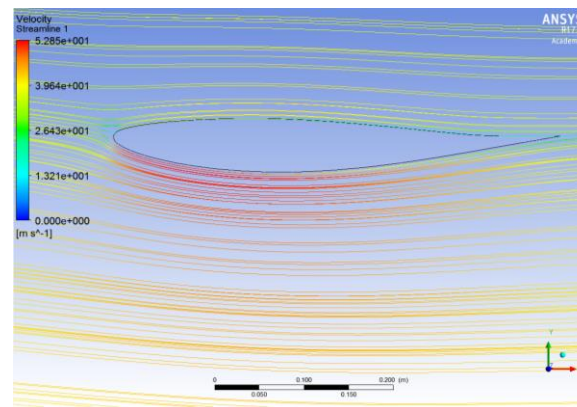
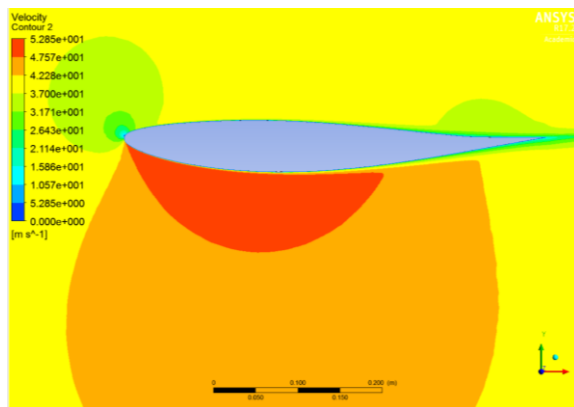
**Figura 29.** Línies de corrent del model de  $K - \epsilon$  per la malla 1 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

## Malla 2

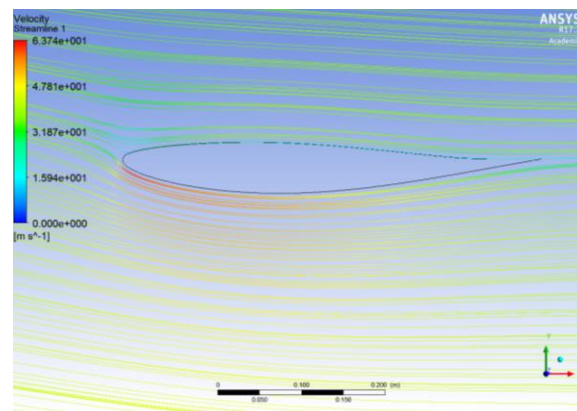
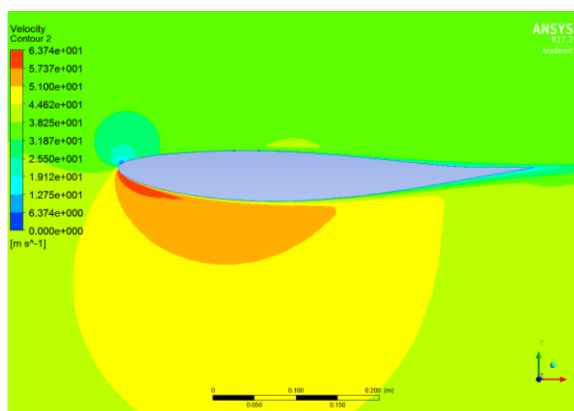
**0°**

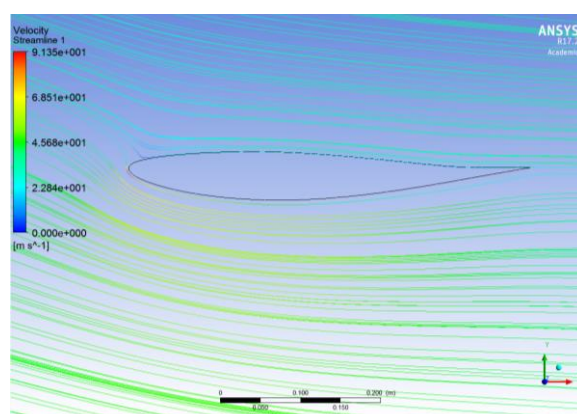
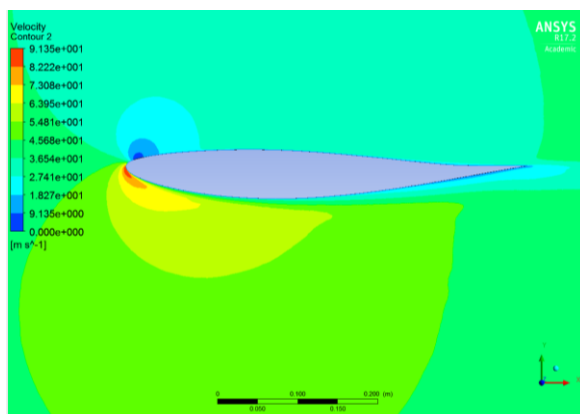
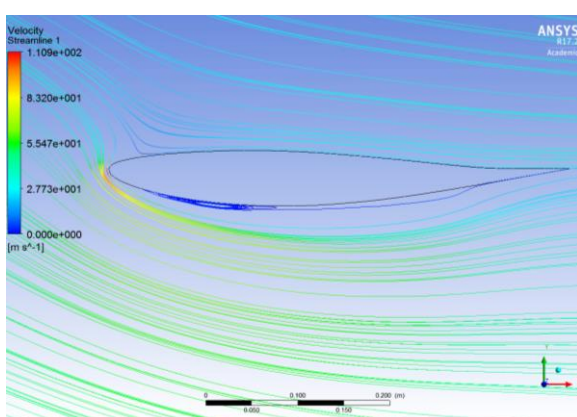
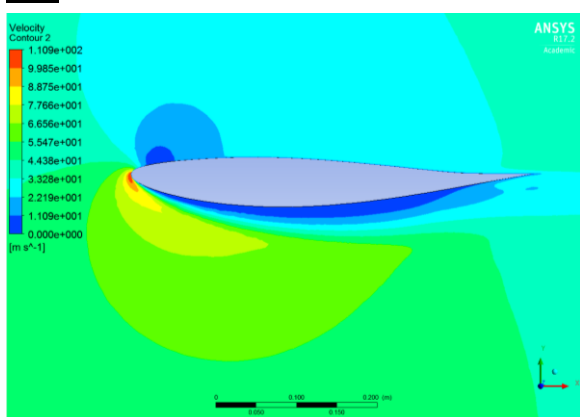
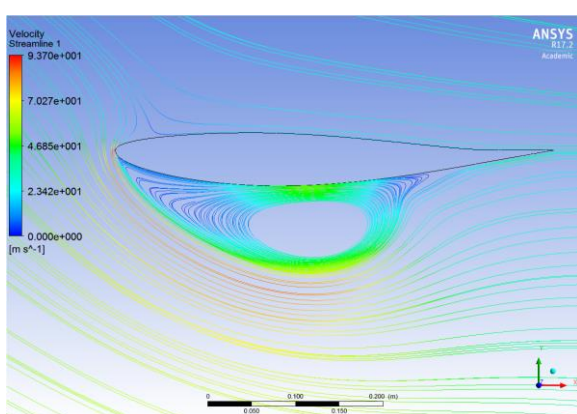
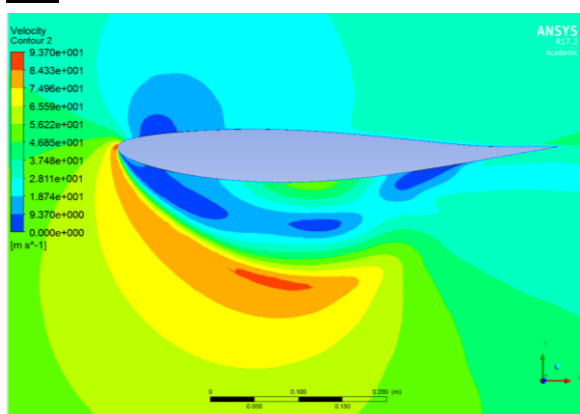


**-2°**



**-5°**



**-10°****-15°****-20°**

**Figura 30.** Contorns de velocitat del model de K –  $\epsilon$  per la malla 2 de 0° a -20°

**Figura 31.** Línies de corrent del model de K –  $\epsilon$  per la malla 2 de 0° a -20°



En les imatges anteriors es pot veure que per la malla 1 no es dona un despreniment clar de la capa límit fins als 20° quan aquest s'hauria de donar entre els 10° i els 15°.

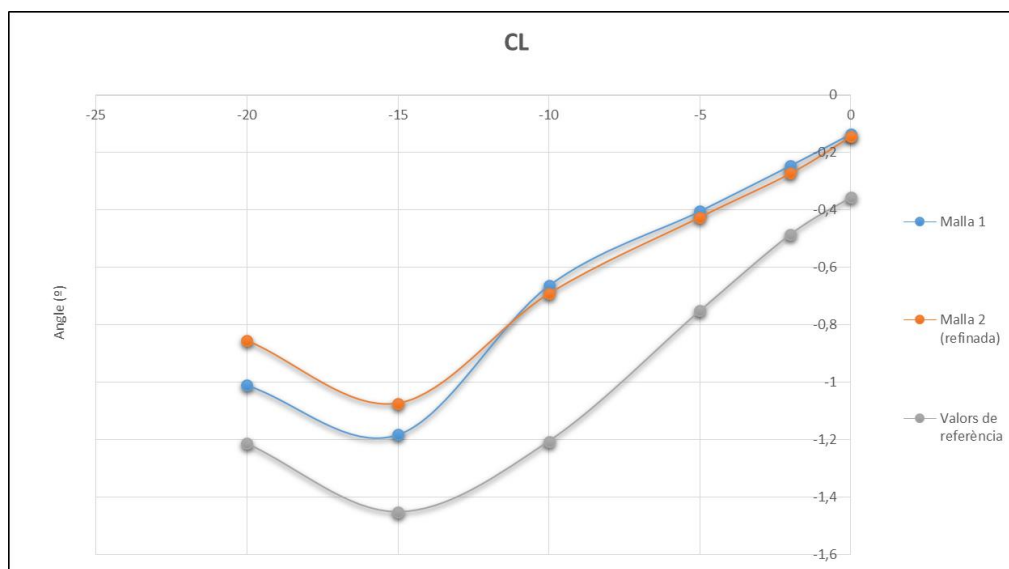
En les imatges referents a la malla 2, sí que es pot observar el principi del despreniment de la capa límit als 15° però en la corba del coeficient de sustentació corresponent a aquesta malla no s'observa, és a dir, que tot i que s'inicia el despreniment de la capa límit encara es dona sustentació en aquest angle i no és fins als 20° que es desprèn totalment.

### 6.2.3. Estudi amb $K - \omega$

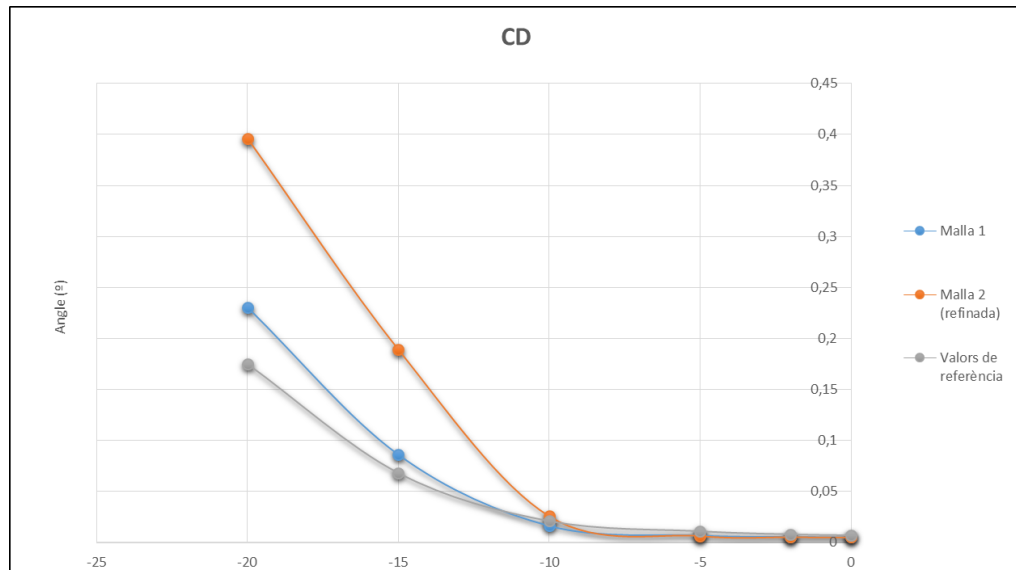
D'aquest model per les dues malles diferents s'obtenen la taula i els gràfics següents:

NACA 63412						
K - $\omega$						
Angle (°)	Malla 1		Malla 2 (refinada)		Valors de referència	
	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
0	-0,1355	0,0052	-0,1438	0,0052	-0,3561	0,0071
-2	-0,2452	0,0056	-0,2722	0,0055	-0,4851	0,0081
-5	-0,4038	0,0069	-0,4249	0,0066	-0,7511	0,0111
-10	-0,6628	0,0164	-0,6907	0,0259	-1,2051	0,0211
-15	-1,1809	0,0861	-1,0724	0,1894	-1,4511	0,0682
-20	-1,0085	0,2304	-0,8537	0,3963	-1,2131	0,1751

**Taula 5.** Resultats K -  $\omega$  per la malla 1, la malla 2 i els valors oficials



**Gràfic 5.** Resultats K -  $\omega$  del coeficient de sustentació



**Gràfic 6.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç

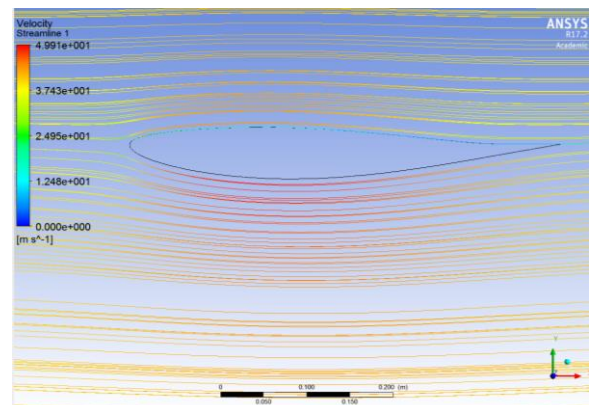
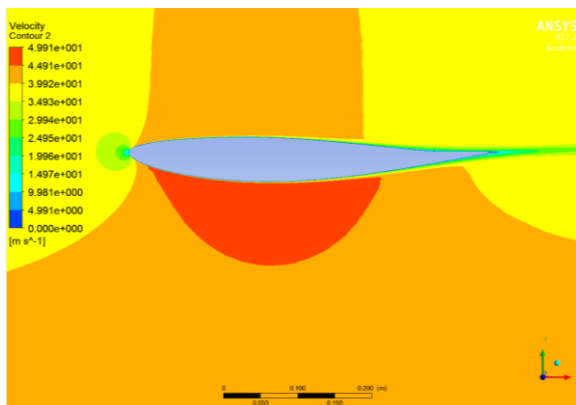
En aquests gràfics es pot observar que les corbes de les dues malles s'ajusten bastant a la corba dels valors de referència. Com en el model de turbulència Spallart – Allarmas, es dona el cas de que la malla 1 s'ajusta als valors esperats per al coeficient de resistència a l'avanç, en canvi la malla 2 es distancia en a partir de l'angle d'atac de  $10^\circ$ .

En el gràfic del coeficient de sustentació destaca que les corbes de les dues malles són similars entre elles i a la corba dels valors de referència.

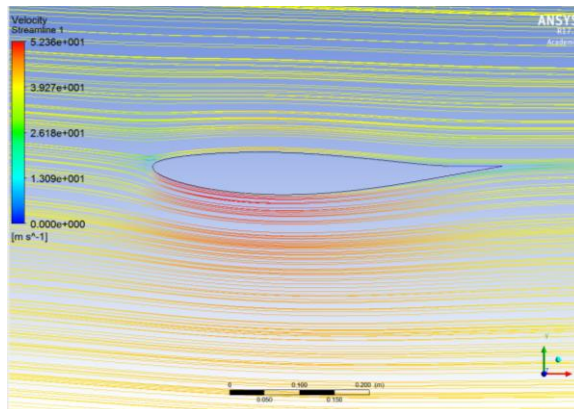
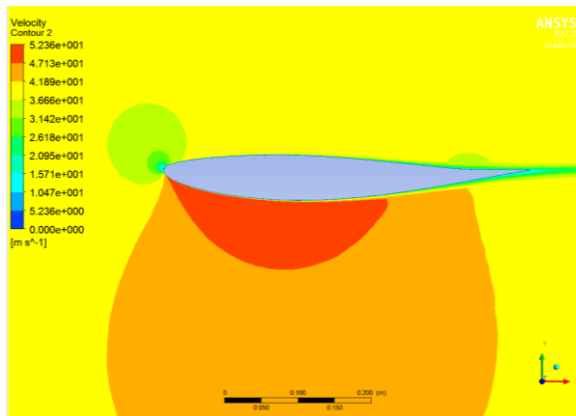
A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència i les dues malles diferents.

## Malla 1

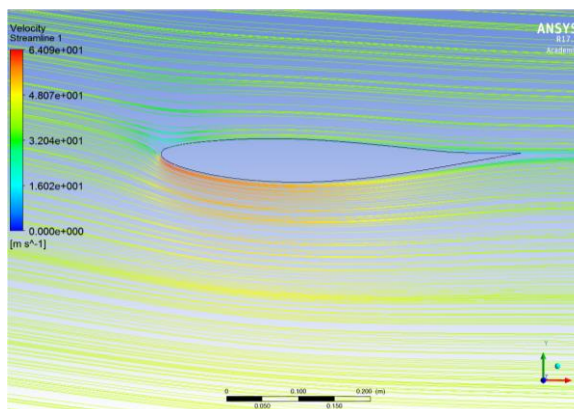
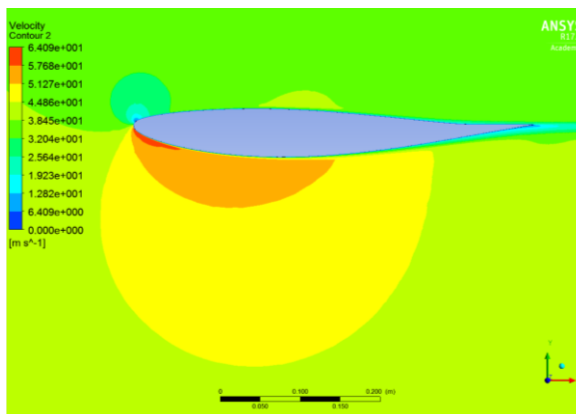
$0^\circ$



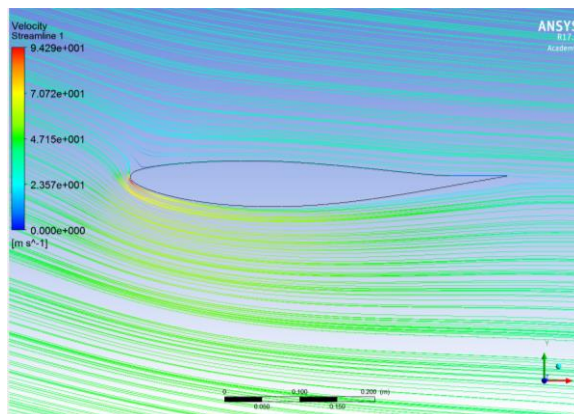
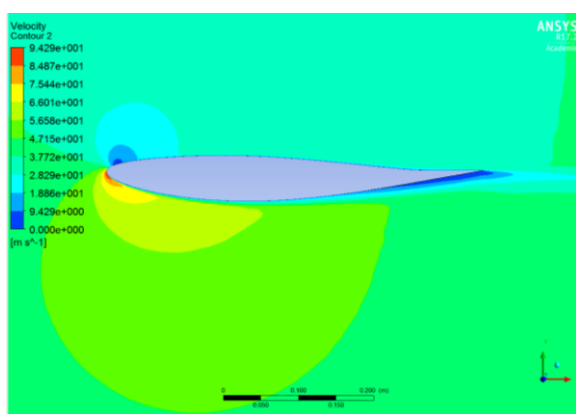
**-2°**

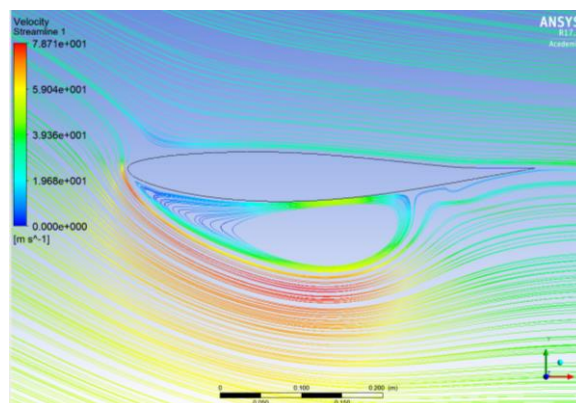
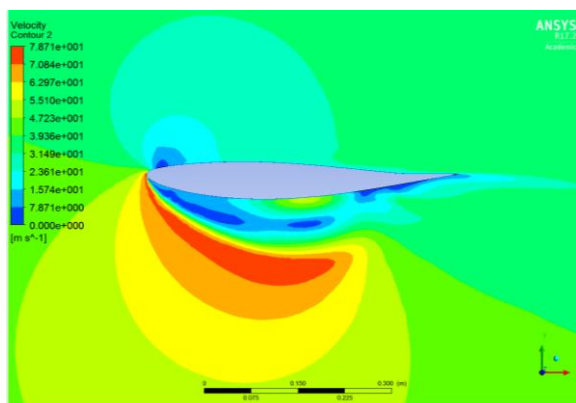
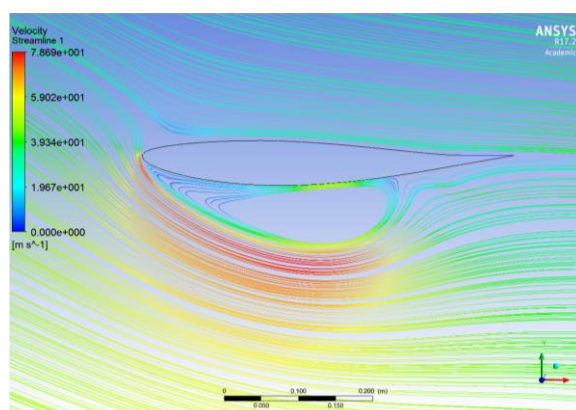
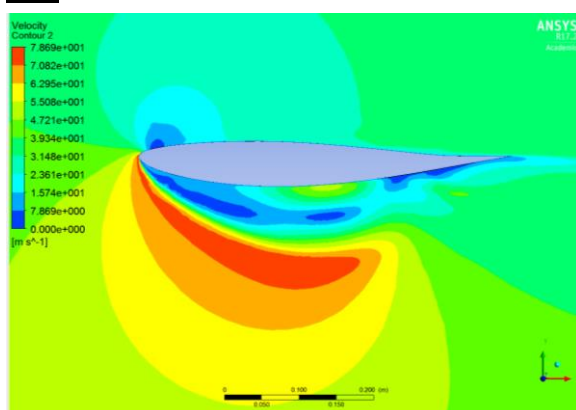


**-5°**



**-10°**



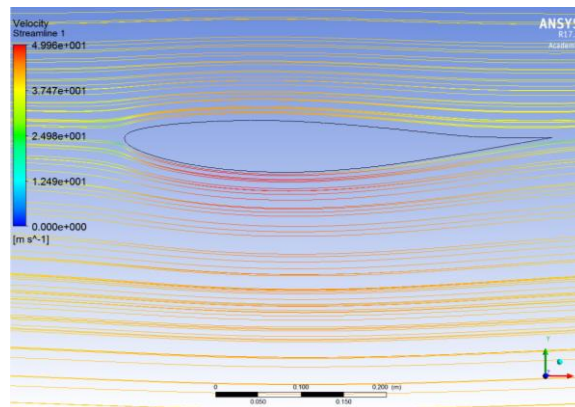
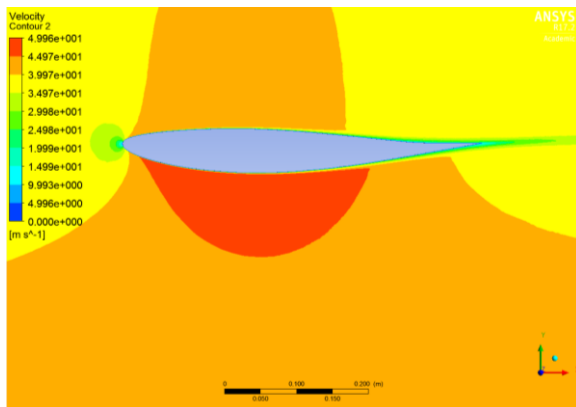
**-15°****-20°**

**Figura 32.** Contorns de velocitat del model de K –  $\omega$  per la malla 1 de 0° a -20°

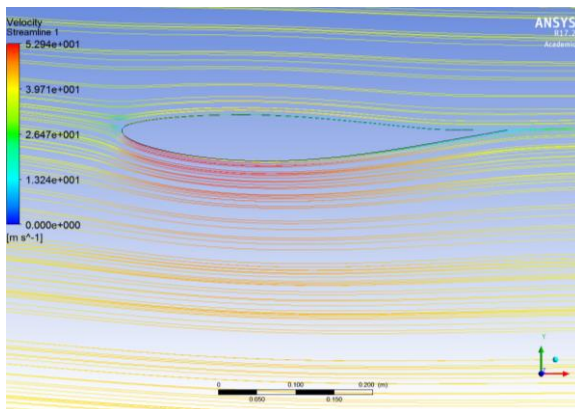
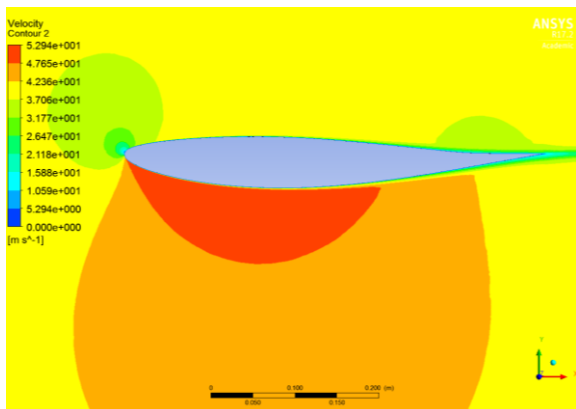
**Figura 33.** Línies de corrent del model de K –  $\omega$  per la malla 1 de 0° a -20°

## Malla 2

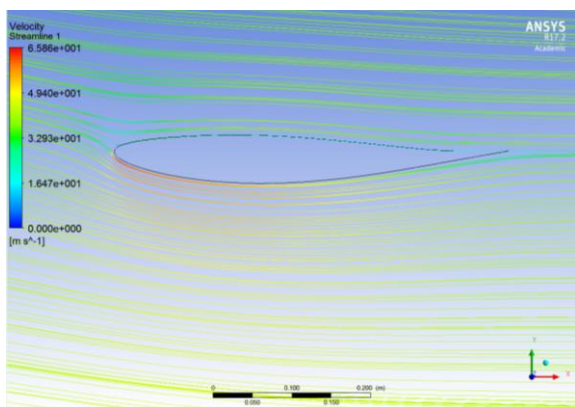
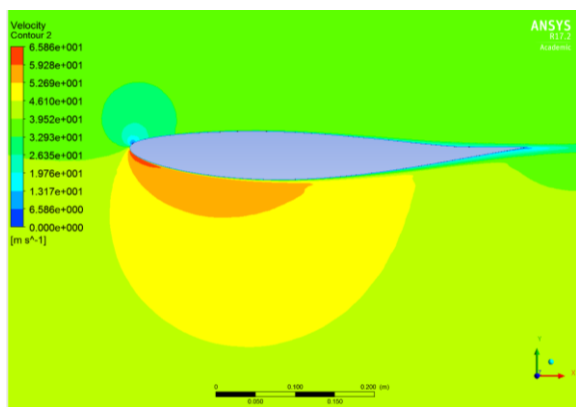
**0°**



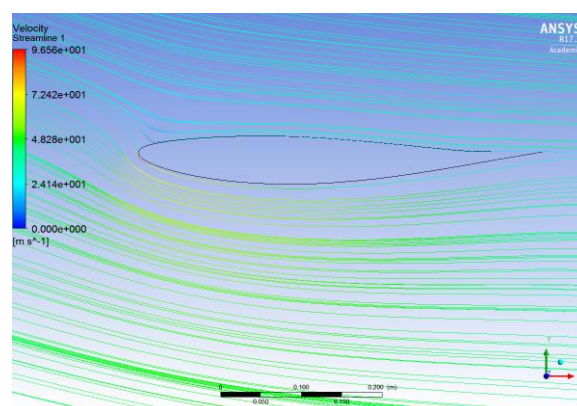
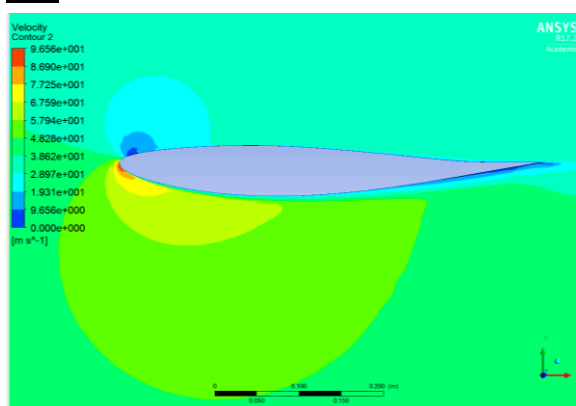
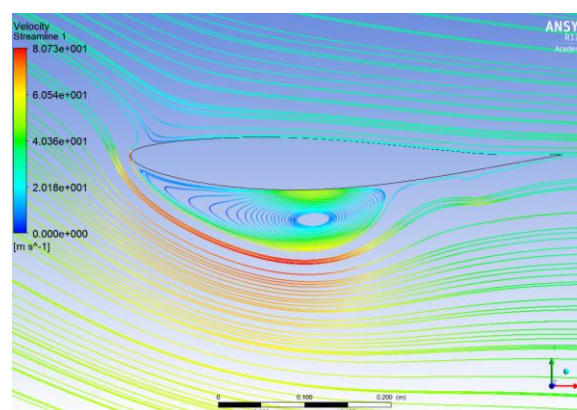
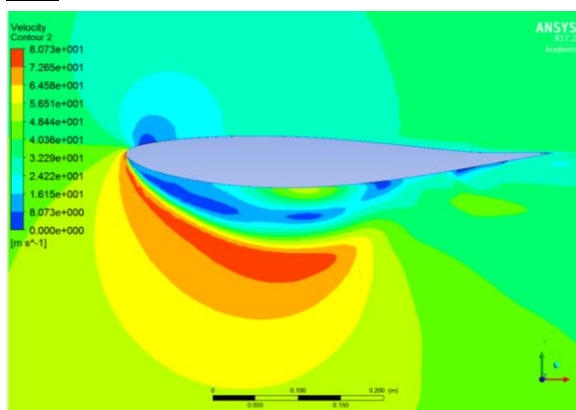
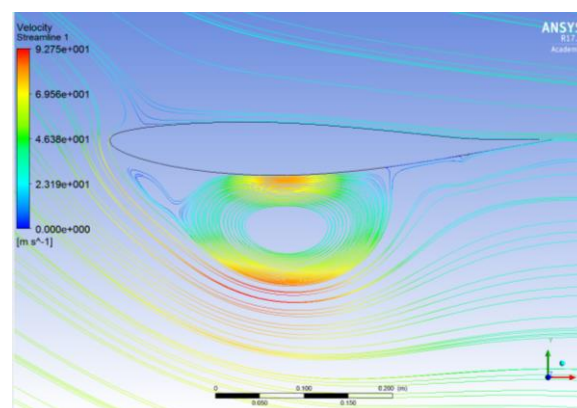
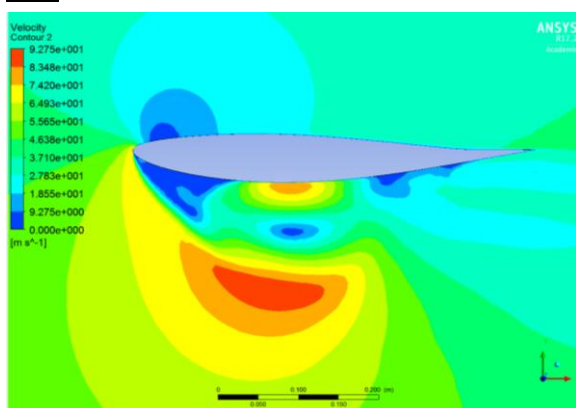
**-2°**



**-5°**





**-10°****-15°****-20°**

**Figura 34.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

**Figura 35.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  per la malla 2 de  $0^\circ$  a  $-20^\circ$

El model  $K - \omega$  demostra tant amb les gràfiques dels coeficients adimensionals com amb les imatges dels contorns de velocitat i de línies de corrent que el desprendiment de la capa límit es dona en els angles d'atac de entre  $10^\circ$  i  $15^\circ$ .

Aquest model genera uns contorns molt semblants als del model Spallart – Allarmas però amb més detall, ja que el fet de resoldre dues equacions li proporciona més precisió.

Una vegada finalitzats els estudis amb aquests tres models de turbulència s'extreuen les següents conclusions:

- A partir de les dades obtingudes es pot fer un anàlisi de la sensibilitat de la malla. En els gràfics del coeficient de sustentació es pot comprovar que els resultats obtinguts per a les dues malles són pràcticament iguals, per tant, aquests no es veuen afectats per la malla. Per una altra banda, en els gràfics del coeficient de resistència a l'avanç es pot observar que els resultats per a cadascuna de les malles sí que mostren petites diferències però aquestes són acceptables en comparació amb els resultats de les malles prèvies.
- El model  $K - \omega$  és el que obté resultats més precisos per aquest estudi. Del model Spallart – Allarmas també se n'extreuen dades coherents comparant-les amb els valors de referència. En canvi, el model  $K - \epsilon$  no dona resultats vàlids en aquest estudi ja que no detecta el desprendiment de la capa límit. Si es comparen els models entre ells destaca la semblança dels resultats, exceptuant el model  $K - \epsilon$  a partir dels  $10^\circ$  d'angle d'atac.

### 6.3. Resultats del estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

Aquest estudi s'ha dut a terme usant tres models de turbulència diferents imposant-los a una sola malla per diferents angles d'atac.

S'ha iniciat fent assajos amb el model de turbulència més senzill, el Spallart – Allarmas.

#### 6.3.1. Estudi amb Spallart - Allarmas

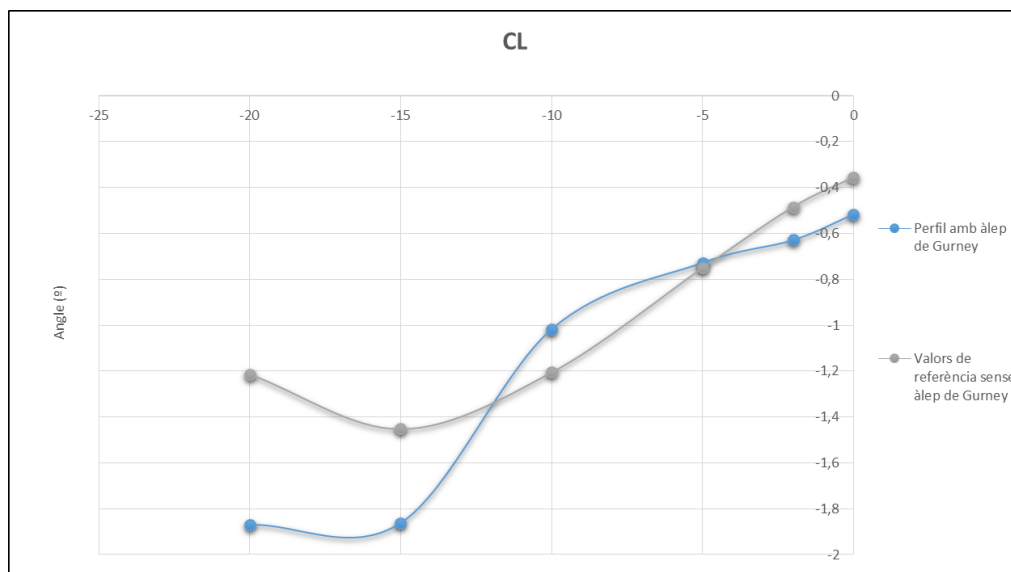
D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

NACA 63412				
Spallart - Allarmas				
Angle (°)	Perfil amb àlep de Gurney		Valors de referència sense àlep de Gurney	
	CL	CD	CL	CD
0	-0,5167	0,00127	-0,3561	0,0071
-2	-0,6283	-0,0009	-0,4851	0,0081
-5	-0,7272	0,0016	-0,7511	0,0111
-10	-1,0171	0,0562	-1,2051	0,0211
-15	-1,8621	0,4108	-1,4511	0,0682
-20	-1,8691	0,6339	-1,2131	0,1751

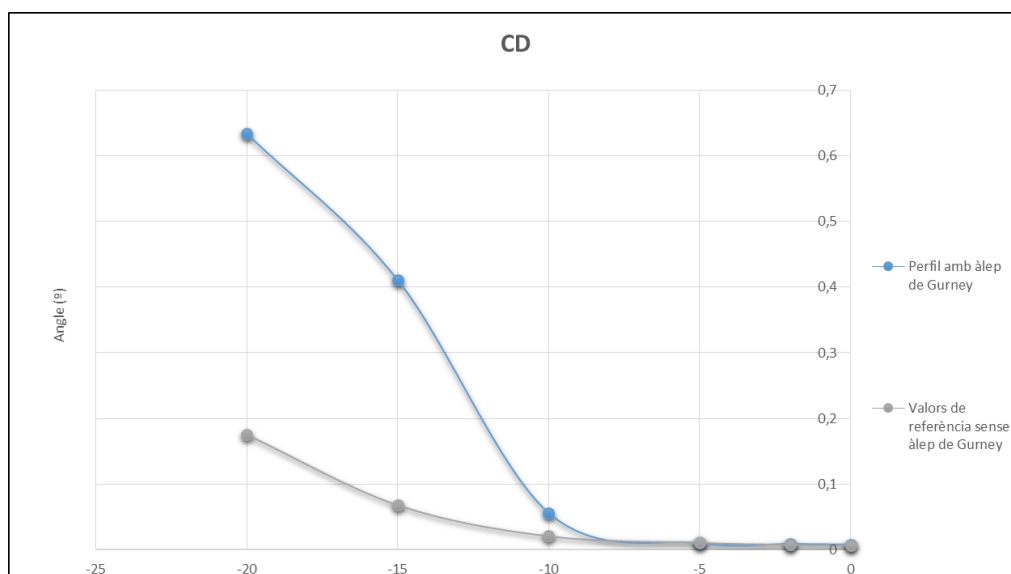
**Taula 6.** Resultats Spallart – Allarmas pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney

Aquests valors de referència que es veuen en la taula són els mateixos que s'han usat com a guia en l'estudi del perfil d'ala sense àlep per tal d'assegurar que els resultats obtinguts eren coherents <sup>[5]</sup>. En aquest estudi s'usen per verificar que els resultats extrets de les simulacions del perfil amb àlep marquen una diferència notable respecte els valors esperats pel perfil NACA sense aquest.





**Gràfic 7.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

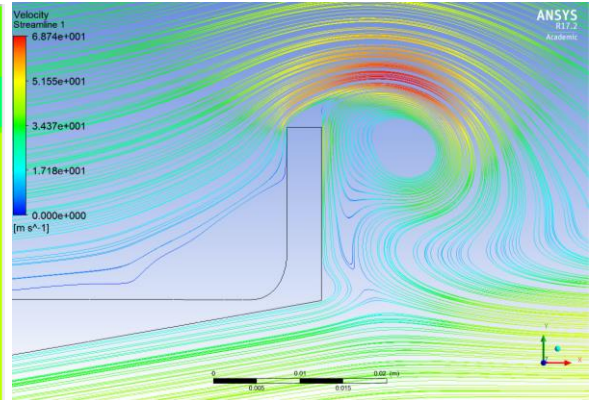
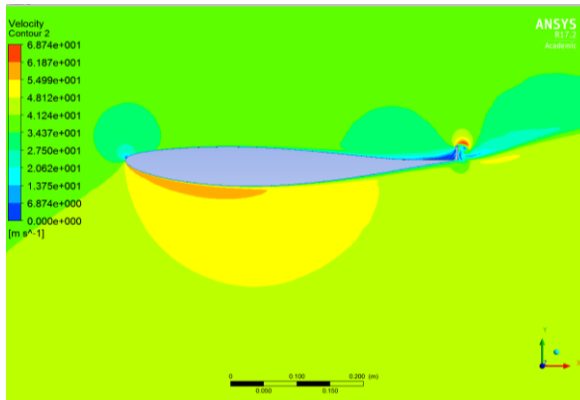


**Gràfic 8.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

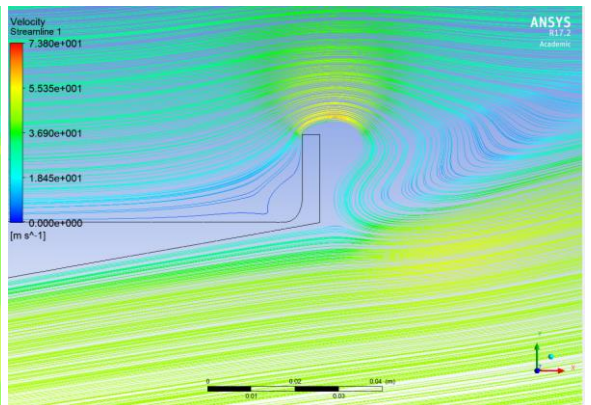
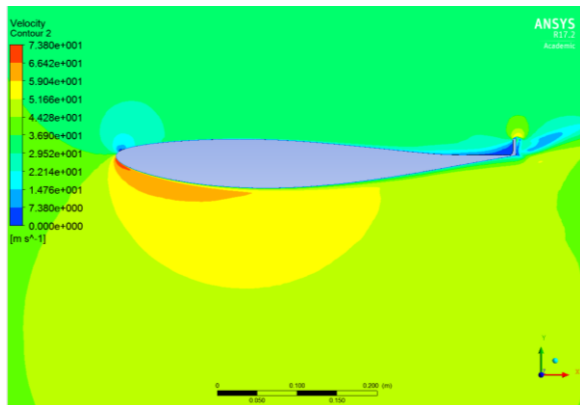
A partir dels valors dels coeficients de sustentació i resistència a l'avanç, es pot dir que aquest model detecta el desprendiment de la capa límit entre els 10° i 15° d'angle d'atac de l'aleró. En els resultats obtinguts també es pot observar que, tot i que el fet d'afegir l'àlep al perfil no atraça el desprendiment, sí que augmenta la sustentació abans de que aquest sigui complet. I, per tant, és una millora de cara a l'aerodinàmica del perfil. La resistència a l'avanç augmenta.

A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència. En el cas de les línies de corrent s'ha agafat la imatge de l'àlep ja que és la més representativa dels seus efectes.

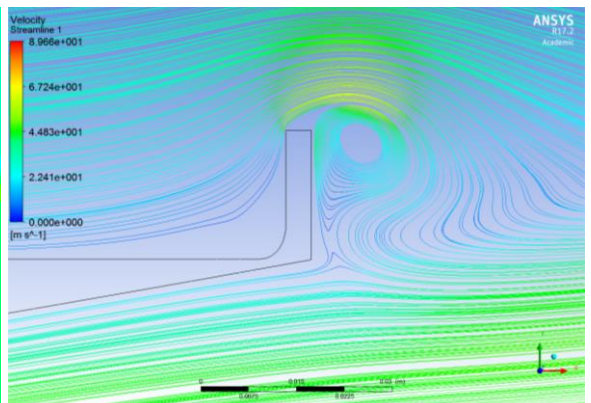
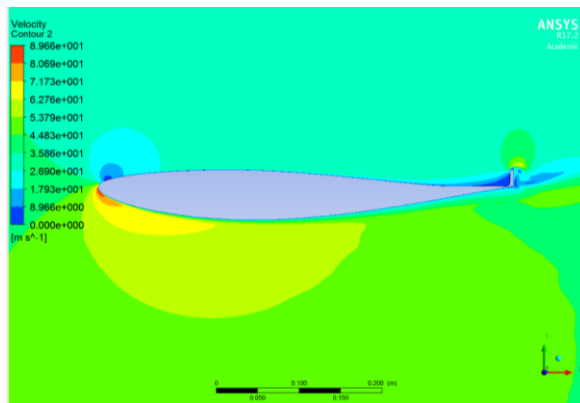
**0°**

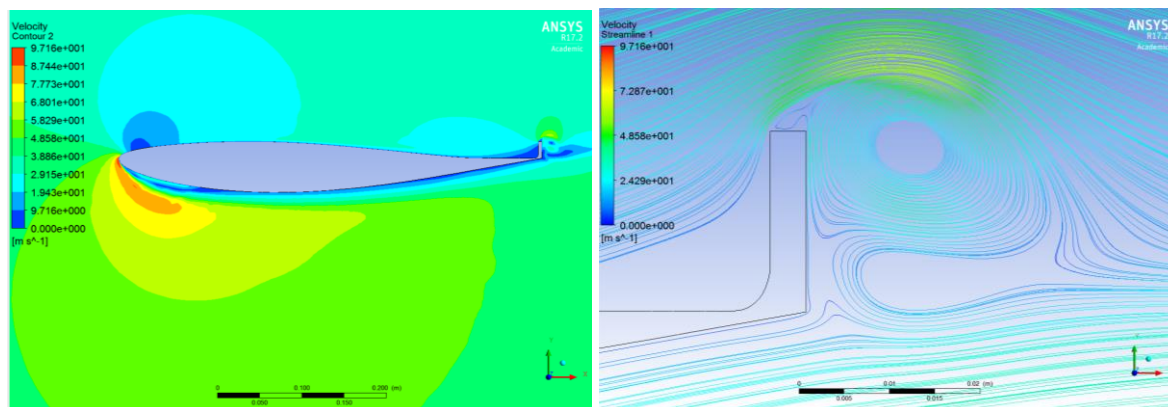
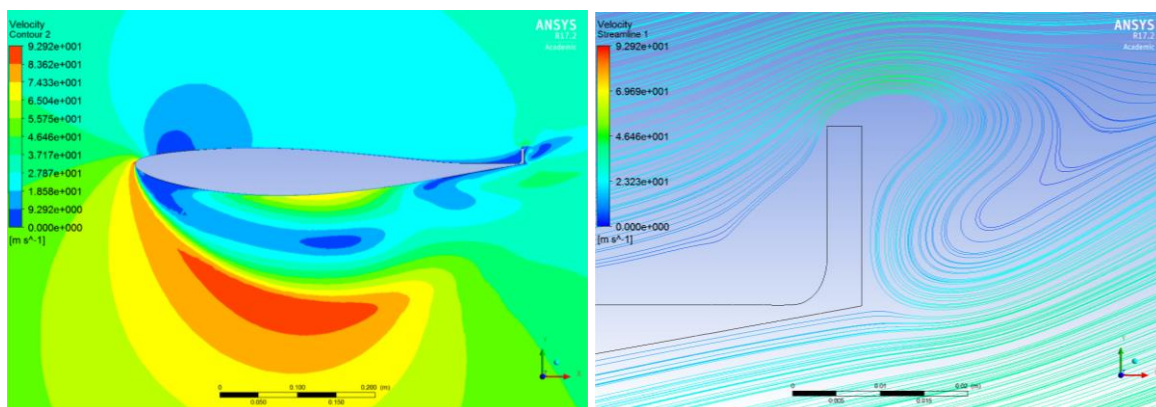
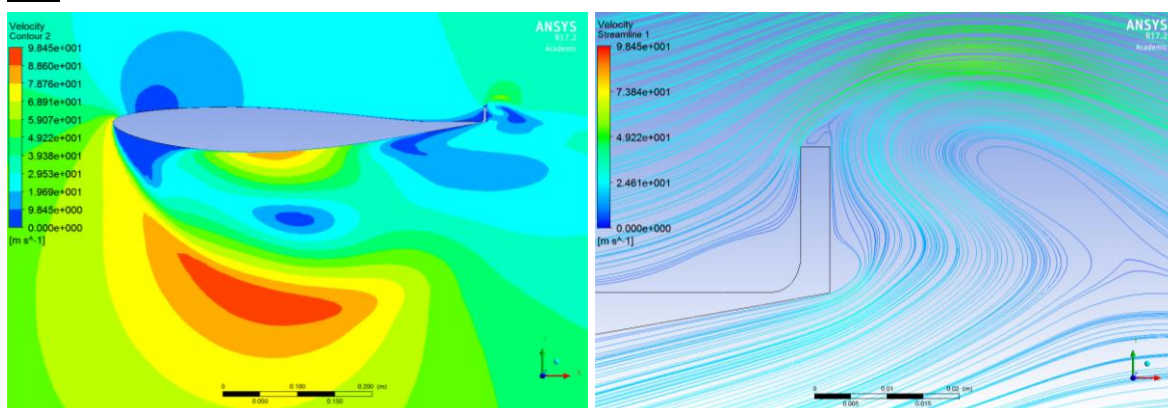


**-2°**



**-5°**



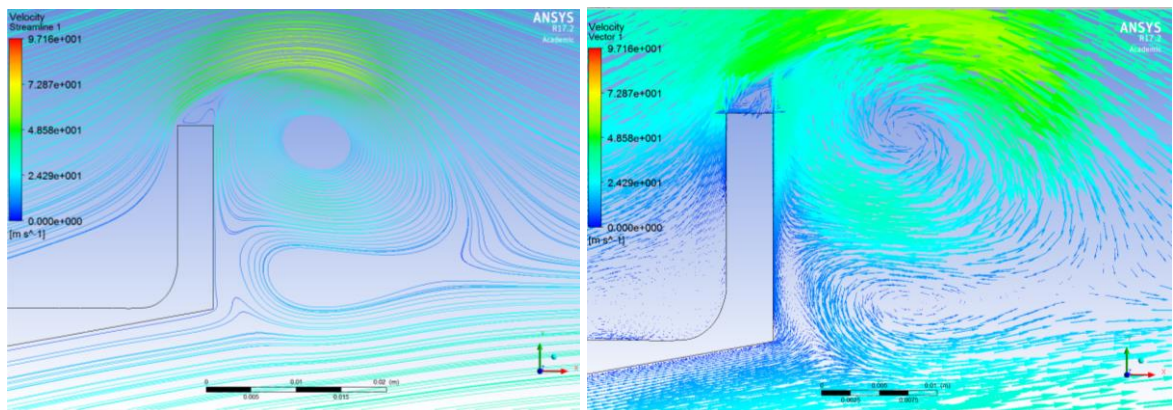
**-10°****-15°****-20°**

**Figura 36.** Contorns de velocitat del model de Spallart – Allmaras perfil amb àlep de 0° a -20°

**Figura 37.** Línies de corrent del model de Spallart – Allmaras perfil amb àlep de 0° a -20°

De les figures anteriors es poden verificar els gràfics dels coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç generats per aquest model. S'observa que el desprendiment comença a l'angle d'atac de  $10^\circ$  i es fa complet als  $15^\circ$  d'una manera brusca.

S'ha de destacar que a les figures de les línies de contorn es pot veure la generació dels dos remolins que giren en sentits contraris a la part posterior de l'àlep de Gurney que fan possible aquest augment de la sustentació negativa abans de que el desprendiment de la capa límit sigui complet. En concret, si s'observa la figura a  $-10^\circ$  de la velocitat d'incidència es poden veure clarament. A la Figura 37 és fan més visibles.



**Figura 38.** Remolins generats per l'àlep de Gurney detectats pel model Spallart – Allmaras

Tot i que els resultats obtinguts amb aquest model són coherents i vàlids, s'ha considerat oportú seguir l'estudi d'aquest perfil amb els models  $K - \epsilon$  i  $K - \omega$  per poder dur a terme una comparativa amb els resultats del perfil sense àlep.

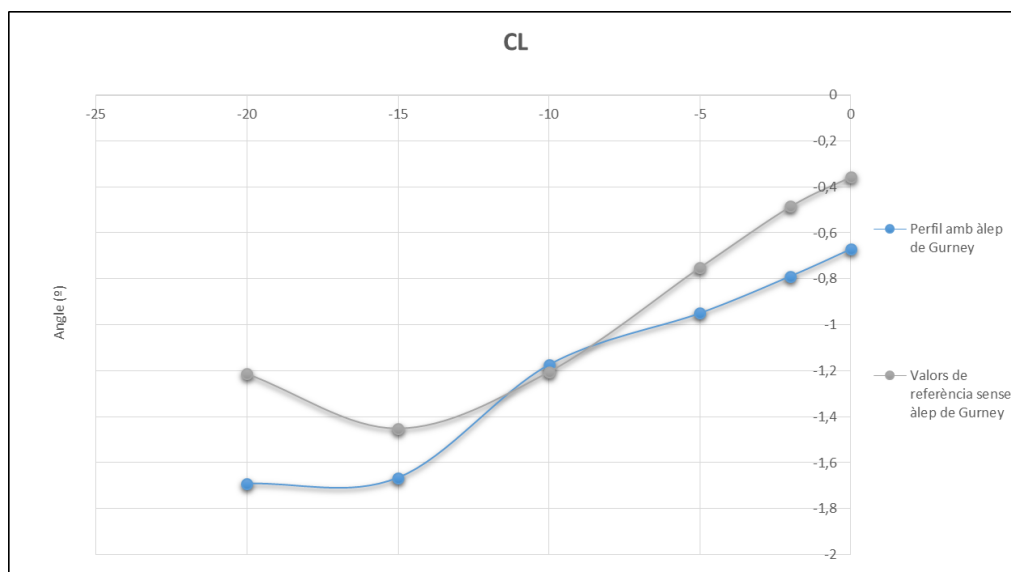
### 6.3.2. Estudi amb $K - \epsilon$

D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

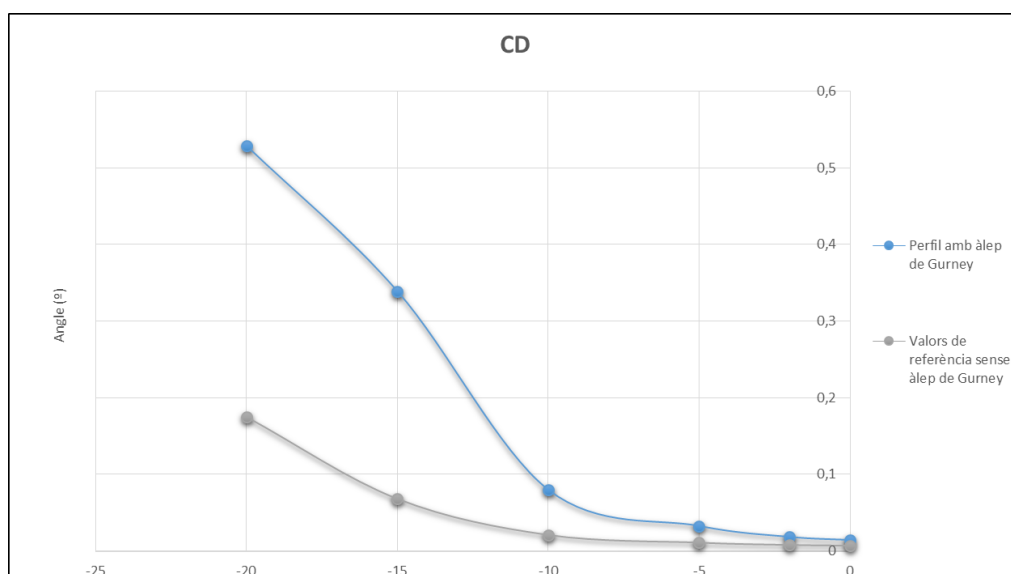
NACA 63412				
K - $\epsilon$				
Angle ( $^\circ$ )	Perfil amb àlep de Gurney		Valors de referència sense àlep de Gurney	
	$C_L$	$C_D$	$C_L$	$C_D$
0	-0,6713	0,0139	-0,3561	0,0071
-2	-0,7888	0,0181	-0,4851	0,0081
-5	-0,9498	0,0324	-0,7511	0,0111
-10	-1,1745	0,0796	-1,2051	0,0211
-15	-1,6655	0,3389	-1,4511	0,0682
-20	-1,6911	0,5288	-1,2131	0,1751

**Taula 7.** Resultats  $K - \epsilon$  pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney





**Gràfic 9.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

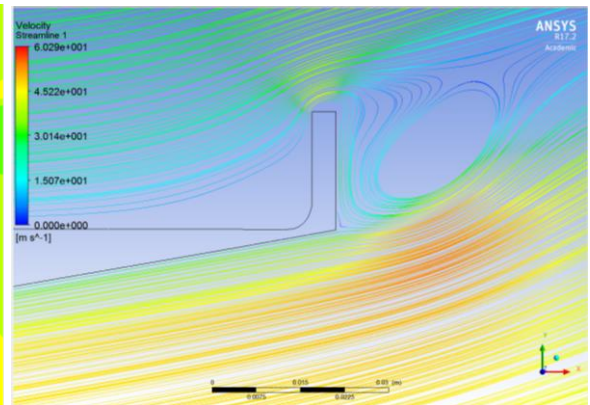
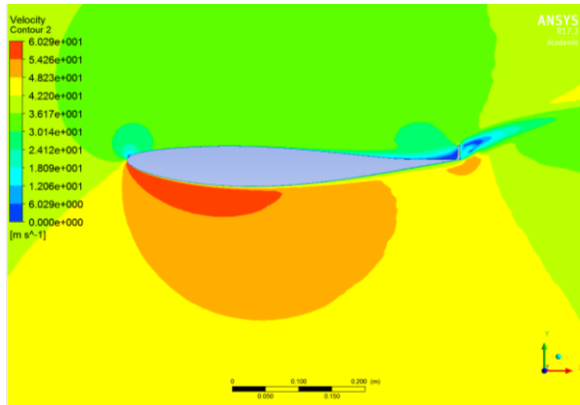


**Gràfic 10.** Resultats  $K - \varepsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

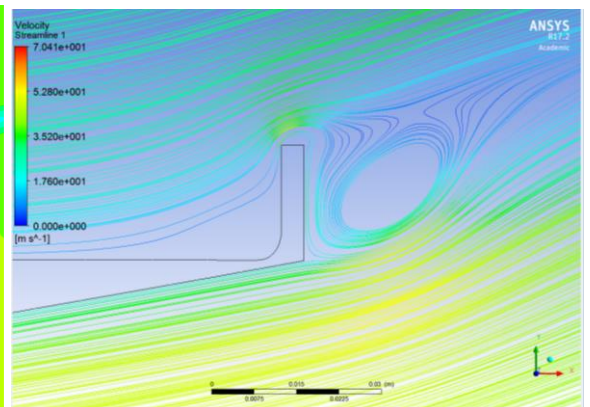
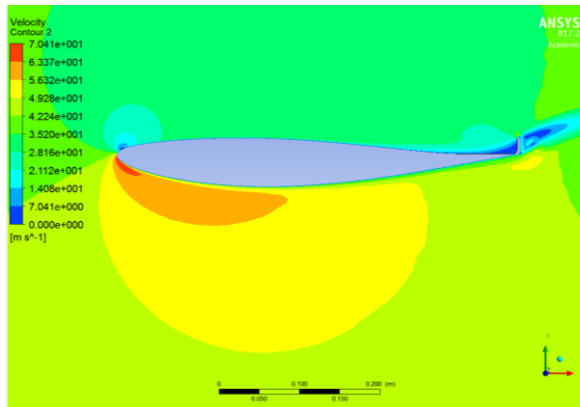
En aquest cas el model  $K - \varepsilon$  sí que detecta el desprendiment de la capa límit. A partir dels valors dels coeficients de sustentació i resistència a l'avanç, es pot dir que aquest es dona entre els 10° i 15° d'angle d'atac de l'aleró. En aquests resultats també es pot observar que, tot i que el fet d'afegir l'àlep al perfil no atraça el desprendiment, sí que augmenta la sustentació abans de que aquest sigui complet, tal i com es demostrava amb el model Spallar – Allarmas. I la resistència a l'avanç també augmenta un cop es desprèn.

A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència. En el cas de les línies de corrent s'ha agafat la imatge de l'àlep ja que és la més representativa dels seus efectes.

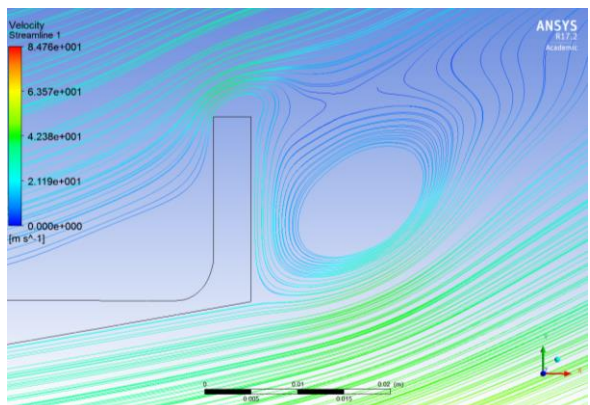
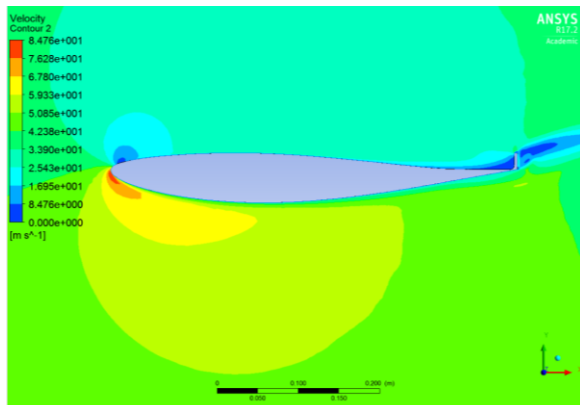
**0°**

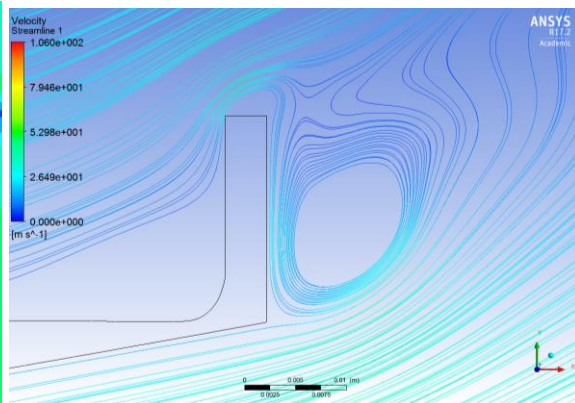
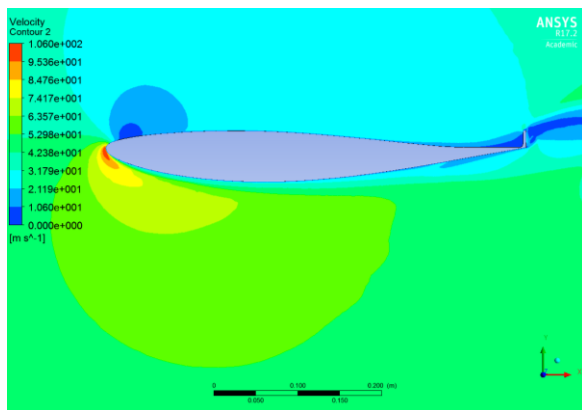
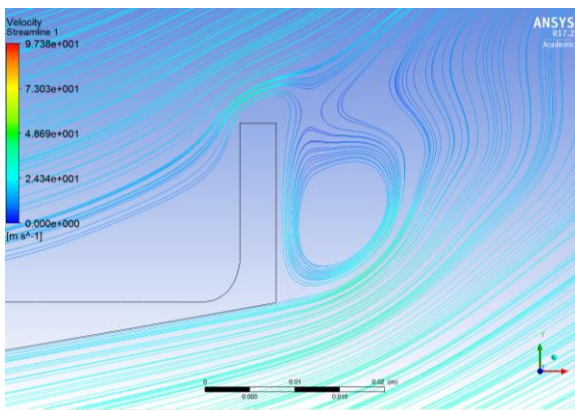
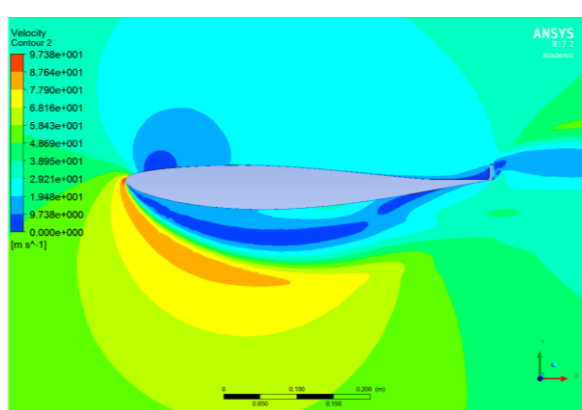
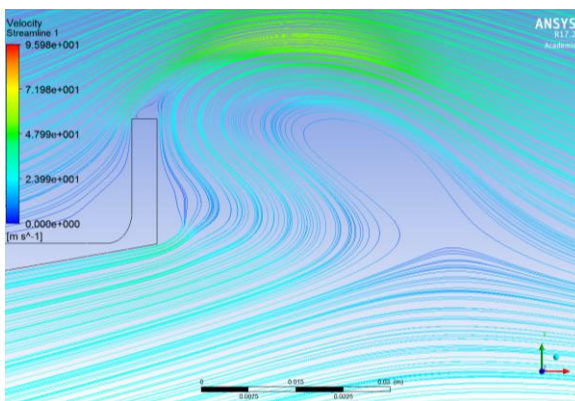
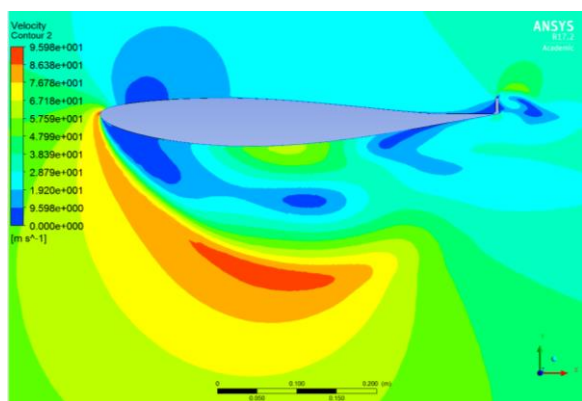


**-2°**



**-5°**



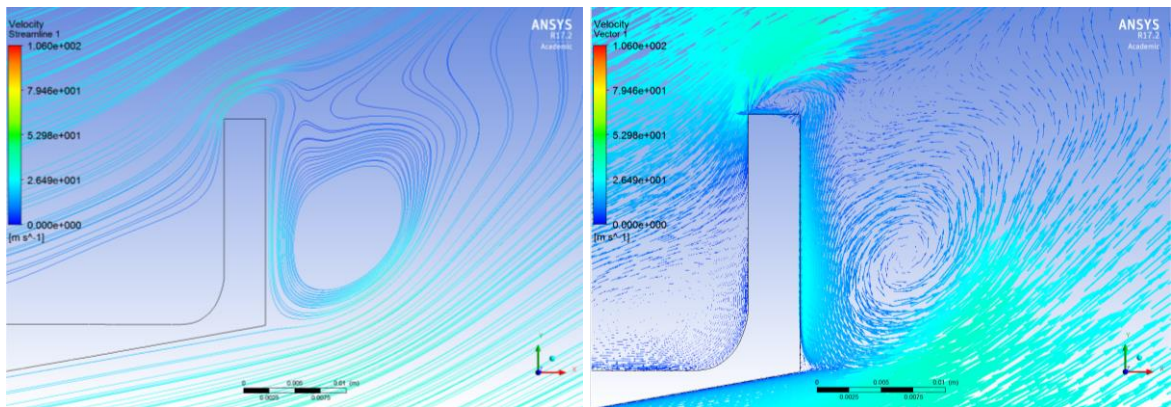
**-10°****-15°****-20°**

**Figura 39.** Contorns de velocitat del model de K –  $\epsilon$  perfil amb àlep de 0° a -20°

**Figura 40.** Línies de corrent del model de K –  $\epsilon$  perfil amb àlep de 0° a -20°

De les figures anteriors es poden verificar els gràfics dels coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç generats per aquest model. Com en el cas del model de Spallart – Allarmas, també s'observa que el desprendiment comença a l'angle d'atac de  $10^\circ$  i es fa complet als  $15^\circ$  d'una manera brusca.

En aquest cas, si s'observa la figura de les línies de contorn a l'angle d'atac de  $10^\circ$ , també es poden intuir els remolins que es formen darrere de l'àlep de Gurney. En aquest cas però, no es veuen tant clarament com en el model de turbulència anterior.



**Figura 41.** Remolins generats per l'àlep de Gurney detectats pel model  $K - \epsilon$

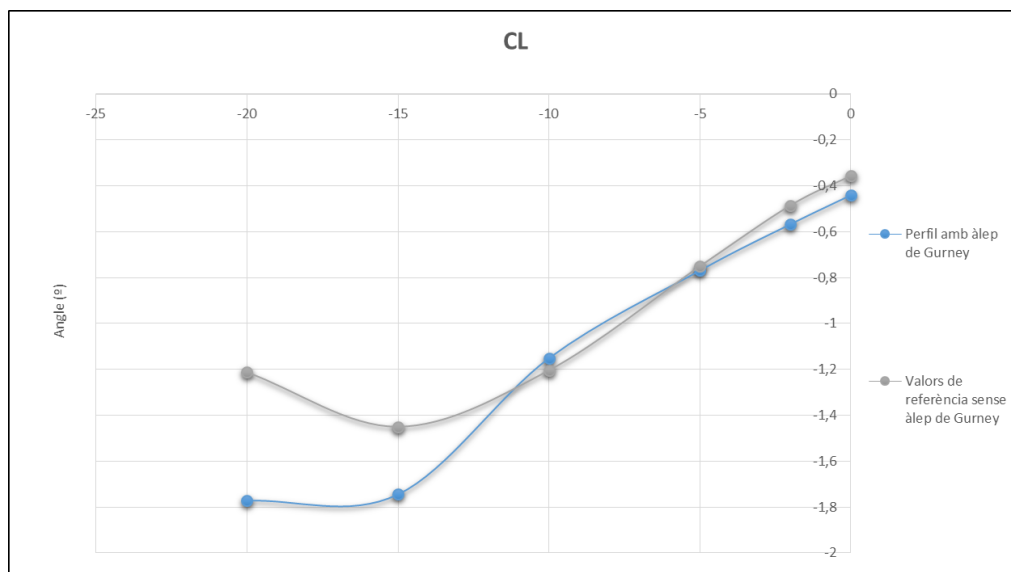
### 6.3.3. Estudi amb $K - \omega$

D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

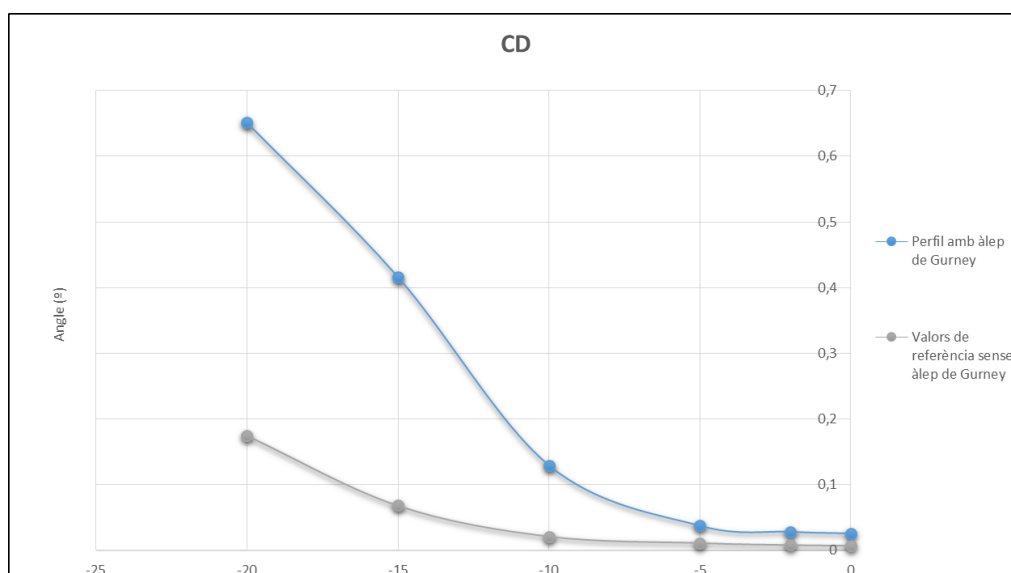
NACA 63412				
$K - \omega$				
Angle ( $^\circ$ )	Perfil amb àlep de Gurney		Valorsde referència sense àlep de Gurney	
	$C_L$	$C_D$	$C_L$	$C_D$
0	-0,4402	0,0259	-0,3561	0,0071
-2	-0,5668	0,0285	-0,4851	0,0081
-5	-0,7687	0,0377	-0,7511	0,0111
-10	-1,1508	0,1297	-1,2051	0,0211
-15	-1,7441	0,4166	-1,4511	0,0682
-20	-1,7709	0,6515	-1,2131	0,1751

**Taula 8.** Resultats  $K - \omega$  pel perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney





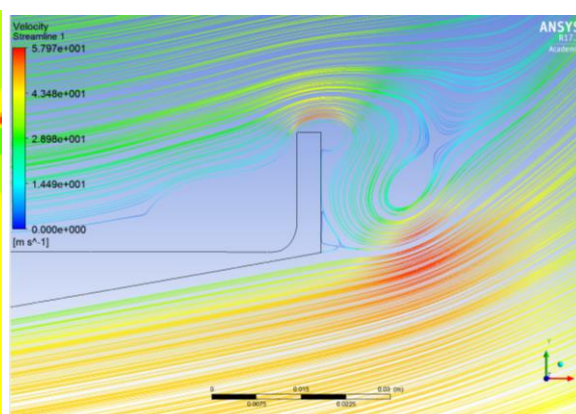
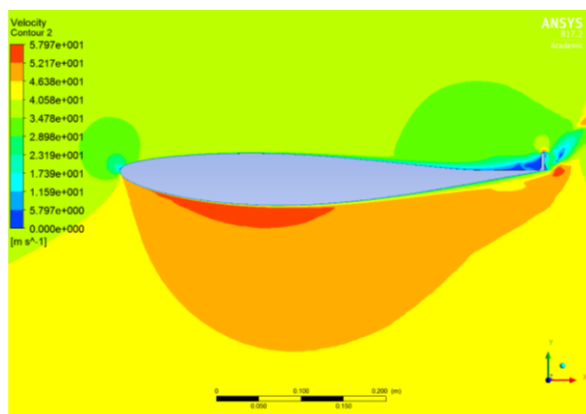
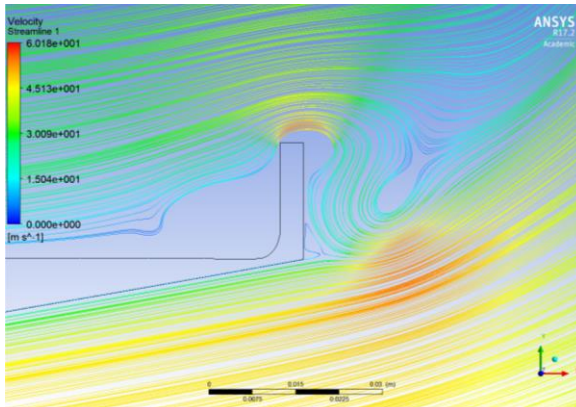
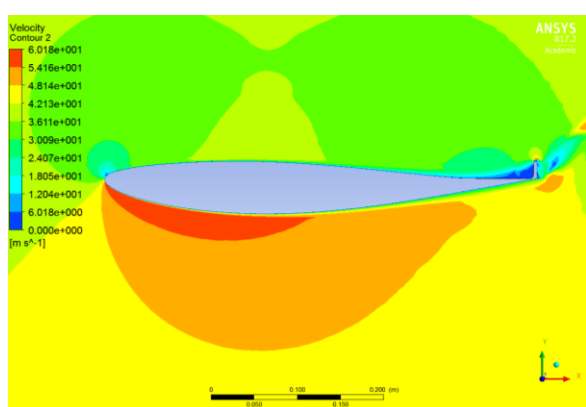
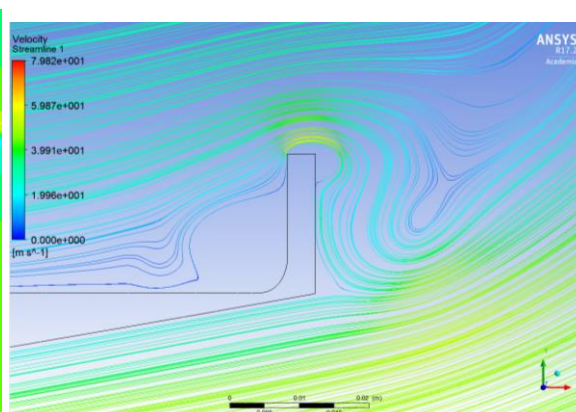
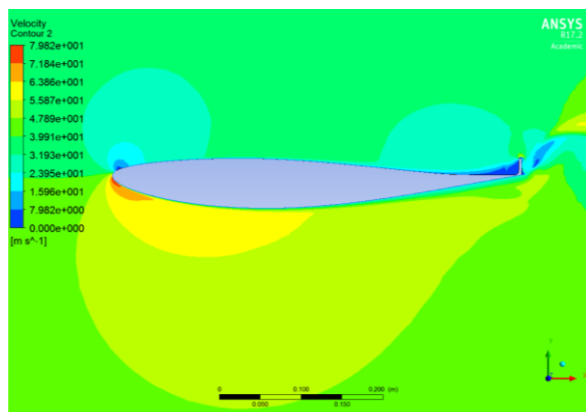
**Gràfic 11.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de sustentació del perfil amb àlep

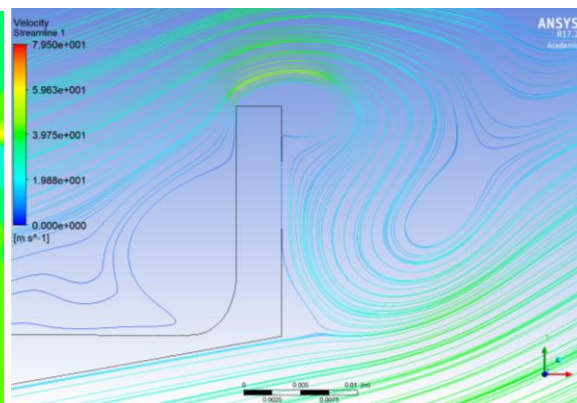
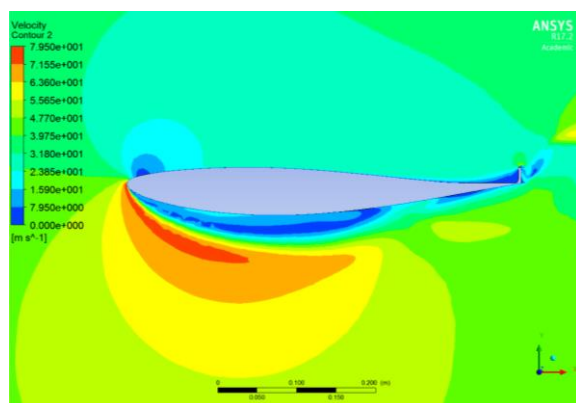
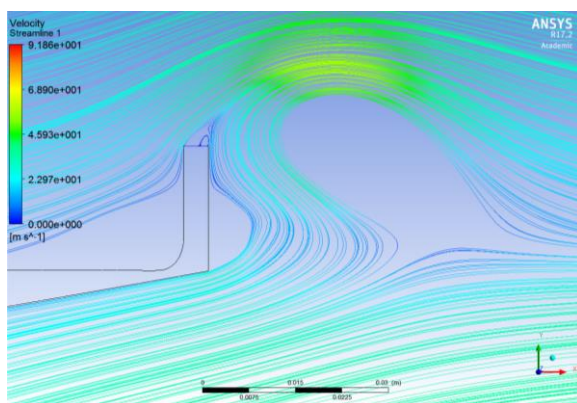
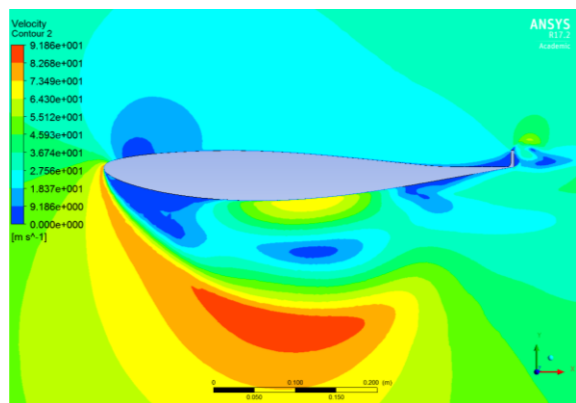
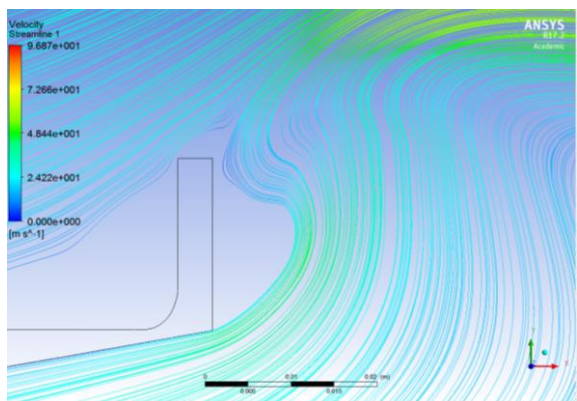
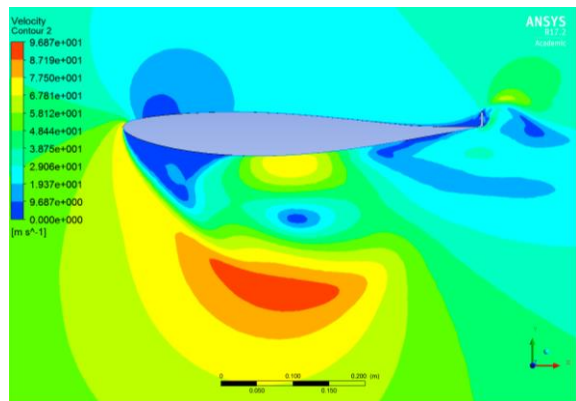


**Gràfic 12.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil amb àlep

Aquest model de turbulència també detecta el desprendiment de la capa límit entre els  $10^\circ$  i els  $15^\circ$ . La sustentació també es redueix molt en aquest tram i la resistència a l'avanç augmenta considerablement.

A continuació es presenten les imatges dels contorns de velocitat i de les línies de corrent pels diferents angles d'atac per a aquest model de turbulència. En el cas de les línies de corrent s'ha agafat la imatge de l'àlep ja que és la més representativa dels seus efectes.

**0°****-2°****-5°**

**-10°****-15°****-20°**

**Figura 42.** Contorns de velocitat del model de K –  $\omega$  perfil amb àlep de 0° a -20°

**Figura 43.** Línies de corrent del model de K –  $\omega$  perfil amb àlep de 0° a -20°

En aquest cas, les figures dels contorns de la velocitat i de les línies de corrent no concorden amb les dades que es representen en els gràfics dels coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç. En les figures es veu que el desprendiment ja s'ha completat a  $10^\circ$  d'angle d'atac, però en els gràfics es veu que aquest s'ha de donar entre els  $10^\circ$  i els  $15^\circ$ .

Per una altra banda, aquest model de turbulència tampoc detecta els remolins inversos que es generen a la part posterior de l'àlep de Gurney.

Una vegada finalitzats els estudis amb aquests tres models de turbulència del perfil NACA amb l'àlep de Gurney s'extreuen les següents conclusions:

- Com s'ha explicat al llarg d'aquest primer estudi, dels tres models de turbulència que s'han usat, només dos han donat resultats coherents, L'Spallart – Allarmas i el  $K - \epsilon$ , ja que en el  $K - \omega$  no concorden les dades obtingudes amb les figures dels contorns de la velocitat. Els resultats obtinguts per als coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç amb els diferents models no disten gaire entre si.
- Els dos remolins que es generen darrere de l'àlep de Gurney que permeten que sustentació negativa augmenti mentre no es completi el desprendiment de la capa límit i que, per tant, el flux es mantingui adherit al perfil durant més temps, es poden veure mitjançant els models Spallart – Allarmas i  $K - \epsilon$ . Tot i que amb el primer d'aquests dos models es visualitzen molt millor.

## 6.4. Comparativa dels estudis del perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney

En aquest apartat es durà a terme la comparativa dels dos perfils estudiats per cada model de turbulència utilitzat per tal de veure la diferència que imposa el afegiment de l'àlep de Gurney.

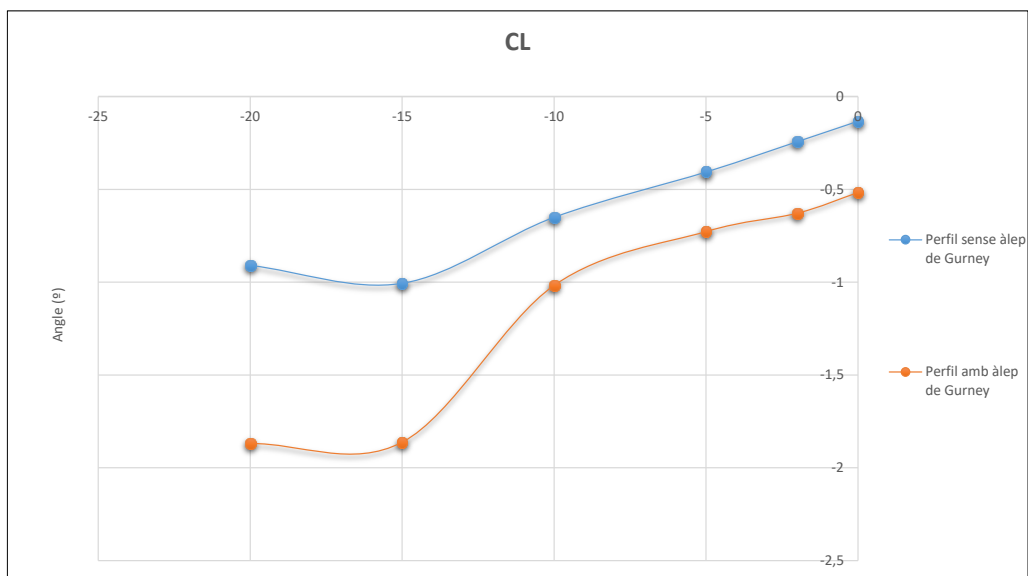
Els resultats que s'han considerat pel perfil sense l'àlep són els obtinguts de la Malla 1, ja que són els que més s'han ajustat als valors esperats.

### 6.4.1. Estudi amb Spallart – Allarmas

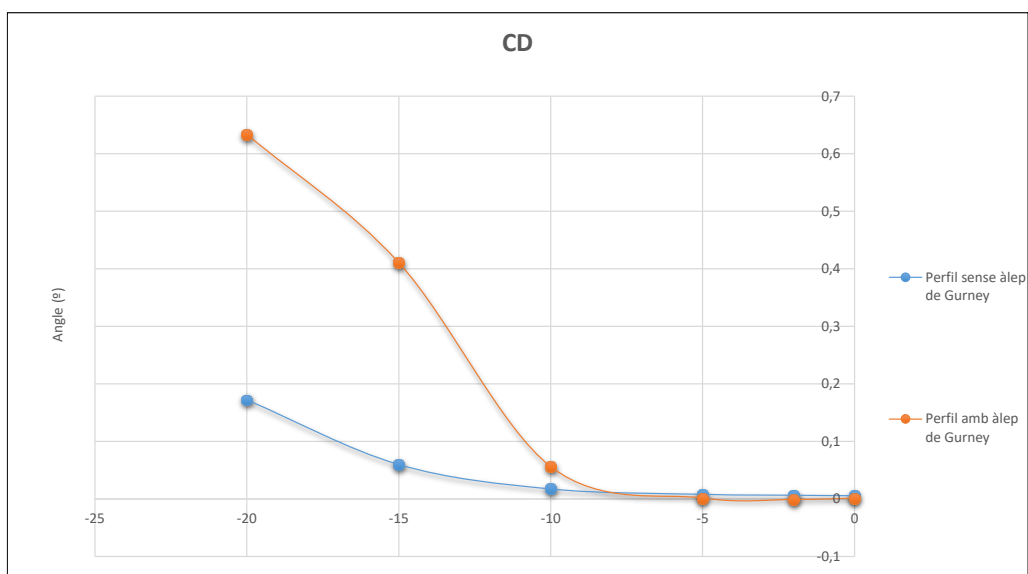
D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

NACA 63412				
Spallart - Allarmas				
Angle (°)	Perfil sense àlep de Gurney (Malla 1)		Perfil amb àlep de Gurney	
	CL	CD	CL	CD
0	-0,1321	0,0059	-0,5167	0,00127
-2	-0,2422	0,0067	-0,6283	-0,0009
-5	-0,4057	0,0083	-0,7272	0,0016
-10	-0,6497	0,0176	-1,0171	0,0562
-15	-1,0054	0,0601	-1,8621	0,4108
-20	-0,9088	0,1723	-1,8691	0,6339

**Taula 9.** Resultats Spallart – Allarmas pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney



**Gràfic 13.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep



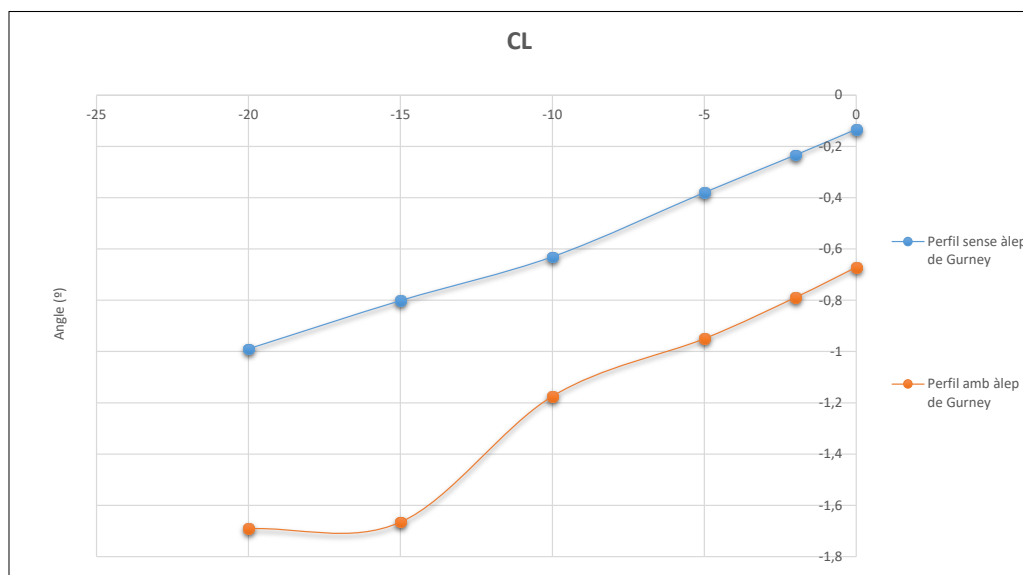
**Gràfic 14.** Resultats Spallart – Allarmas del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

### 6.4.2. Estudi amb $K - \epsilon$

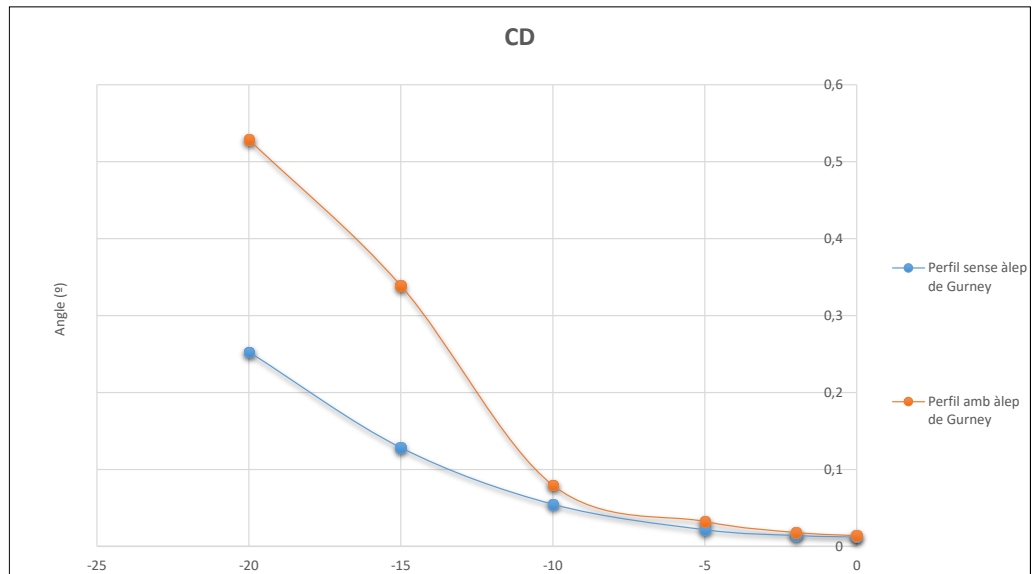
D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

NACA 63412				
K - $\epsilon$				
Angle (°)	Perfil sense àlep de Gurney (Malla 1)		Perfil amb àlep de Gurney	
	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>D</sub>
0	-0,1331	0,0121	-0,6713	0,0139
-2	-0,2335	0,0142	-0,7888	0,0181
-5	-0,3799	0,0217	-0,9498	0,0324
-10	-0,6305	0,0548	-1,1745	0,0796
-15	-0,8015	0,1284	-1,6655	0,3389
-20	-0,9896	0,2528	-1,6911	0,5288

**Taula 10.** Resultats  $K - \epsilon$  pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney



**Gràfic 15.** Resultats  $K - \epsilon$  del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep



**Gràfic 16.** Resultats  $K - \epsilon$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

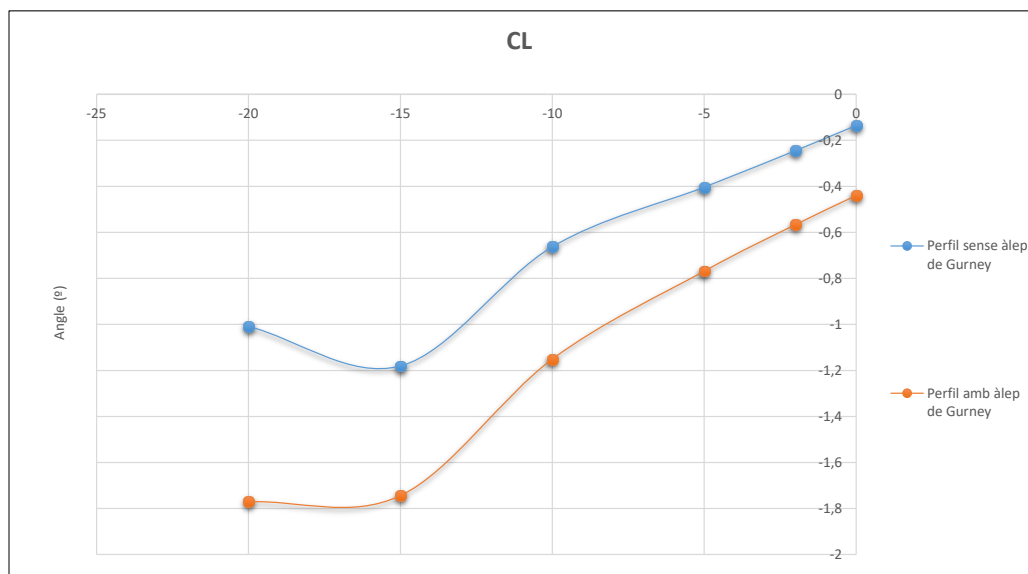
#### 6.4.3. Estudi amb $K - \omega$

D'aquest model s'obté la taula i els gràfics següents:

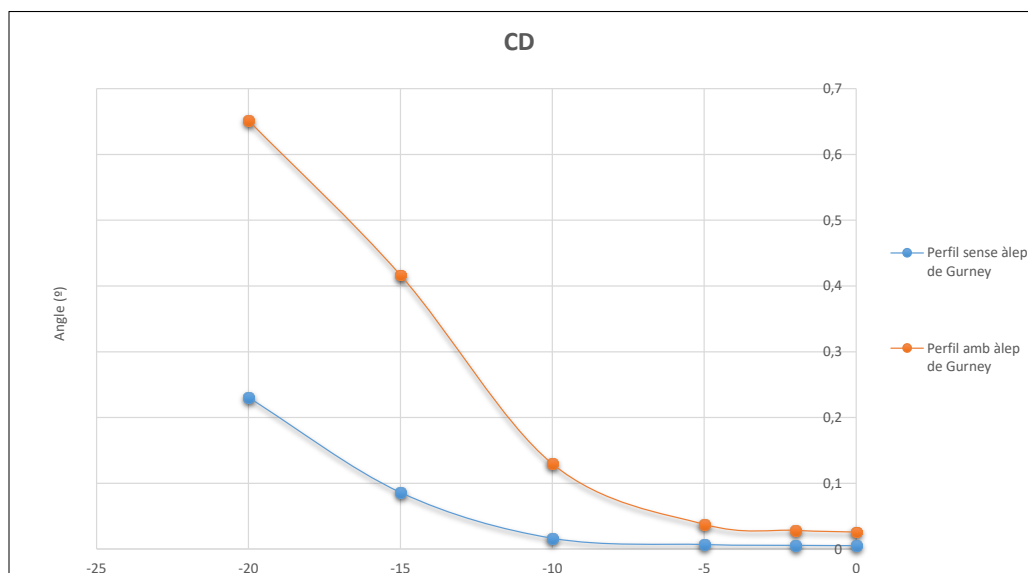
NACA 63412				
$K - \omega$				
Angle (°)	Perfil sense àlep de Gurney (Malla 1)		Perfil amb àlep de Gurney	
	$C_L$	$C_D$	$C_L$	$C_D$
0	-0,1355	0,0052	-0,4402	0,0259
-2	-0,2452	0,0056	-0,5668	0,0285
-5	-0,4038	0,0069	-0,7687	0,0377
-10	-0,6628	0,0164	-1,1508	0,1297
-15	-1,1809	0,0861	-1,7441	0,4166
-20	-1,0085	0,2304	-1,7709	0,6515

**Taula 11.** Resultats  $K - \omega$  pel perfil NACA 63412 sense i amb àlep de Gurney





**Gràfic 17.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de sustentació del perfil sense i amb àlep



**Gràfic 18.** Resultats  $K - \omega$  del coeficient de resistència a l'avanç del perfil sense i amb àlep

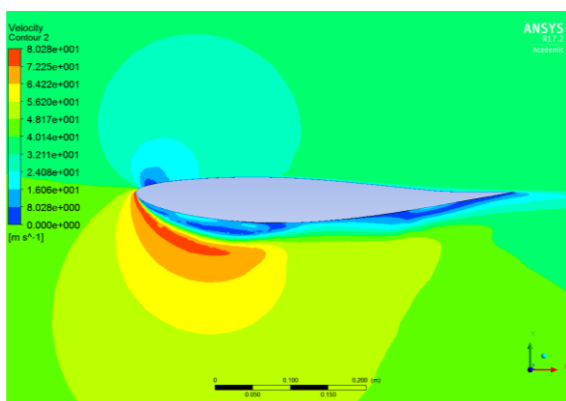
Els models de turbulència de Spallart – Allarmas i  $K - \omega$  tenen valors molt semblants. Pel perfil sense àlep de Gurney es té un despreniment entre els  $10^\circ$  i  $15^\circ$  d'angle d'atac. El fet d'afegir l'àlep, abaixa la corba del coeficient de sustentació i provoca que al llarg del despreniment, també entre  $10^\circ$  i  $15^\circ$ , aquesta tingui un pendent més elevat, és a dir, augmenta la sustentació negativa fins al punt en que el despreniment és complert.

En el cas del coeficient de resistència a l'avanç per aquests dos models, la corba del perfil sense àlep és suau i augmenta quan es dona el despreniment. Pel perfil amb àlep de Gurney aquest augment és molt més brusc.

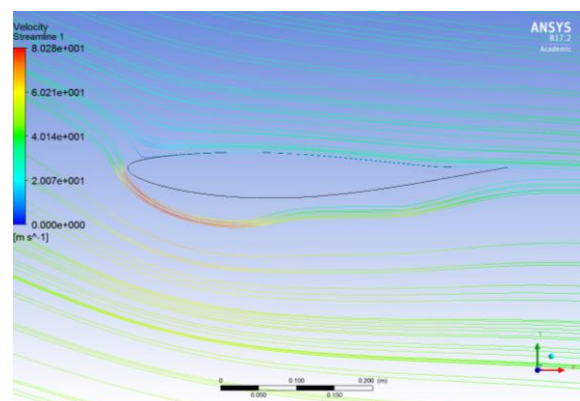
Pel cas del model de turbulència  $K - \epsilon$ , pel perfil amb àlep de Gurney es tenen unes corbes dels coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç molt semblants als dos models anteriors. La diferència sorgeix en la corba del coeficient de sustentació del perfil sense àlep, ja que aquesta no contempla el despreniment de la capa límit quan ha de ser-hi, entre  $10^\circ$  i  $15^\circ$ .

## 6.5. Revisió del perfil

Al analitzar els resultats obtinguts, destaca el fet de que el despreniment de la capa límit és molt brusc. En els models que ho representen correctament es veu que el despreniment s'inicia als  $10^\circ$  i que als  $15^\circ$  és complert. Degut a aquest fet s'ha considerat necessari fer una simulació del perfil sense àlep de Gurney, ja que és amb el que es treballa en tots els estudis, amb el model  $K - \omega$  i per a la malla 1 a  $12^\circ$  d'angle d'atac, per tal de comprovar que el despreniment no és brusc, sinó que la capa límit es va separant a poc a poc del perfil. Aquesta simulació genera les imatges següents:



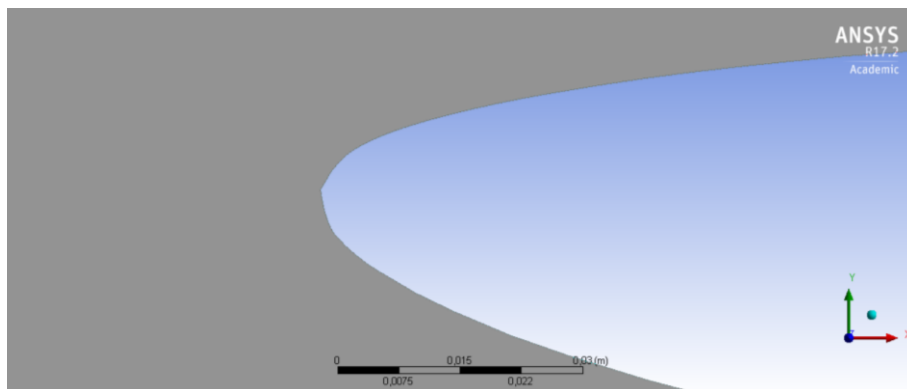
**Figura 44.** Contorns de velocitat del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep a  $12^\circ$  d'atac



**Figura 45.** Línies de corrent del model de  $K - \omega$  perfil amb àlep a  $12^\circ$  d'atac

De les figures anteriors es pot destacar el fet que a  $12^\circ$  d'angle d'atac la capa límit ja s'ha

després completament. Aquest fet senyala un possible error en la part davantera de la geometria del perfil que probablement és el que provoca aquesta separació brusca. Com es pot veure en la Figura 46, es dona un petit vèrtex en la part frontal que, tot i que s'hi ha insistit, no s'ha pogut arrodonir suficient manualment.



**Figura 46.** Vèrtex de la geometria del perfil

Un dels treballs futurs que es proposa com a continuació i millora d'aquest projecte és arrodonir aquest vèrtex per comprovar i fer un estudi de sensibilitat per tal de demostrar que és aquest l'error que provoca el despreniment sobtat.



## 7. Impacte ambiental

L'impacte ambiental que es deriva d'aquest projecte és petit ja que es tracta d'un projecte de caire més aviat teòric.

S'han de tenir en compte les despeses en electricitat que s'han causat quan s'ha utilitzat l'ordinador, tant per realitzar les simulacions necessàries com per buscar informació i redactar la memòria.

Aquestes despeses en electricitat produeixen una certa quantitat de CO<sub>2</sub> que es emesa al medi ambient. Per tal de fer un càlcul aproximat del total d'emissions es considera que s'ha utilitzat ordinadors durant un total de 250 hores.

S'ha considerat que la potència mitjana que consumeix un ordinador de sobretaula és de 310 W (0,31 kW)<sup>[7]</sup> per hora. Així doncs es calcula que el consum total del projecte és de 77.5 kWh.

Per calcular les emissions de CO<sub>2</sub> totals produïdes s'ha considerat el coeficient del pas d'energia final a emissions de CO<sub>2</sub> definit pel ministeri d'indústria, energia i turisme per a electricitat convencional peninsular, que és de 0,649 kg CO<sub>2</sub>/kWh<sup>[8]</sup>. Obtenint així el valor tota de emissions produïdes, que és de 50,298 kg de CO<sub>2</sub>.

Per altra banda també s'ha de tenir en compte les emissions de gasos contaminants que s'han produït al realitzar els viatges a la universitat, ja que aquests s'han realitzat amb cotxe. Els viatges s'han realitzat des de Piera, que és on estic vivint, a la universitat. Cada trajecte té una distància de 50 km aproximadament, per tant, per cada dia que he anat a la universitat s'han de comptar 100 km. Tenint en compte els dies de treball (72) surt una distància total de 7.200 km. Tenint en compte que a la fitxa tècnica del vehicle utilitzat especifica que les emissions de CO<sub>2</sub> són de 149 g/100 km es calculen unes emissions totals de 10,728 kg de CO<sub>2</sub>.

Per últim cal dir que també s'han produït despeses en electricitat quan s'ha treballat amb llum artificial o quan s'han utilitzat fulls de paper per realitzar càlculs o prendre els apunts que eren necessaris. Però aquests valors són molt petits i difícils de quantificar, així doncs no s'han tingut en compte en l'impacte mediambiental.

Així doncs les emissions totals produïdes de CO<sub>2</sub> són de 61,026 kg.



## 8. Pressupost

Per tal de realitzar un càlcul aproximat del cost total del projecte a continuació es detallen tots els factors que s'han considerat i la despesa que provoquen. Per una banda hi ha la utilització dels ordinadors de la universitat amb una durada de 250 hores i un cost mitjà de l'electricitat de 0,12 €/kWh<sup>[9]</sup>, extret de les dades de diverses companyies elèctriques.

El cost del software utilitzat, ANSYS Workbench, no s'ha considerat ja que s'ha treballat amb una llicència estudiantil de 6 mesos de durada gratuïta.

També hi ha el nombre d'hores invertides en aquest projecte, tant de recerca d'informació com de simulació i de redacció de la memòria, considerant un sou de becari de 7,2 €/hora. Per altra banda hi ha el cost de desplaçament, com ja s'ha comentat anteriorment, el projecte s'ha realitzat a la universitat i això implica que s'hagin fet molts viatges amb cotxe. S'han considerat un total de 7.200km realitzats amb un consum mitjà del cotxe de 6,2 l cada 100 km, extret de la fitxa tècnica del vehicle, i amb un preu de la gasolina de 1,189€/l<sup>[10]</sup>. També s'ha d'afegir el cost del desgast del vehicle amb el quilometratge, s'han considerat 0,35€/km. Per últim s'han tingut en compte les despeses de imprimir tota la memòria i enquadernar-la. S'ha estimat un cost de 50 €, basat en impressions de treballs fetes anteriorment.

En aquesta taula es fa un resum del càlcul del cost del projecte desglossat en els diferents factors que s'han tingut en compte:

CONCEPTE				COST
Desplaçaments a la universitat	7200 km	6,2 l / 100 km	1,189 €/l	530,77 €
		0,20 €/km		1.440,00 €
Hores treballades	320 hores		7,2 €/h	2.304,00 €
Electricitat del ordinador	250 hores	0,31 kW/h	0,12 €/kWh	9,30 €
Imprimir i enquadernar				50,00 €
<b>COST TOTAL</b>				<b>4.334,07 €</b>

**Taula 12.** Pressupost del projecte

Com es pot observar a la taula el cost total del projecte és de 4.334,07 €. Si es considera una durada de 6 mesos, que és el temps dedicat a la realització del treball, ens surt un cost mensual de 722,35 €/mes.





## Conclusions

L'objectiu principal d'aquest projecte era aconseguir simular l'efecte de l'afegiment de l'àlep de Gurney a un aleró. Aquest objectiu s'ha assolit amb èxit mitjançant la comparació dels resultats de l'estudi del perfil NACA 63412 amb els resultats de l'estudi del mateix perfil amb l'àlep en qüestió. També s'ha aconseguit simular els dos remolins de gir contrari que són els causants de l'augment de la sustentació del perfil un cop se li afegeix l'àlep de Gurney.

Comparant les dades obtingudes amb les de l'estudi experimental <sup>[1]</sup>, es treu la conclusió de que en els dos estudis el despreniment de la capa límit succeeix entre els mateixos angles d'atac tant pel perfil sense àlep de Gurney com per el perfil amb àlep. Observant els gràfics del coeficient de sustentació i de resistència a l'avanç per ambdós estudis, destaca un augment tant de la sustentació com de la resistència a l'avanç un cop s'afegeix l'àlep al perfil de l'aleró.

Els estudis d'aquest projecte s'han dut a terme amb l'eina Fluent amb diferents models de turbulència. Un dels objectius secundaris que han sorgit al llarg del treball és demostrar que aquests modes no afecten als resultats. Aquest objectiu no s'ha aconseguit completament ja que en l'estudi del perfil NACA s'han obtingut resultats coherents pels models Spallart – Allarmas i  $K - \omega$ , en canvi, pel perfil NACA amb l'àlep de Gurney, els models Spallart – Allarmas i  $K - \epsilon$  són els que han donat millors resultats. El fet de que el model Spallart – Allarmas doni resultats coherents en ambdós estudis fa pensar que la malla escollida no és prou fina ja que aquest model està pensat per simulacions ordinàries malles més bastes.

Finalment, com a treball futur o millora d'aquest projecte, es proposa interpolar les corbes del perfil adequadament per tal de que en la seva geometria no hi hagi cap vèrtex, sobretot en la part davantera. D'aquesta manera es pretén comprovar que el despreniment sobtat que s'observa en les simulacions d'aquest projecte ve donat per aquest error.



## Agraïments

Primer de tot m'agradaria agrair el suport rebut tant per part de la meva família com per part dels amics que al llarg de tot el projecte m'han animat i m'han ajudat. M'agradaria donar les gràcies especialment als meus pares i a la meva parella pel seu recolzament incondicional.

Finalment voldria agrair al meu tutor, Esteve Jou, pel suport i els consells prestats durant la realització del projecte.

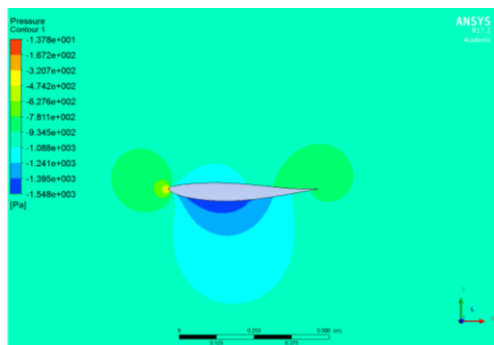


## ANNEX

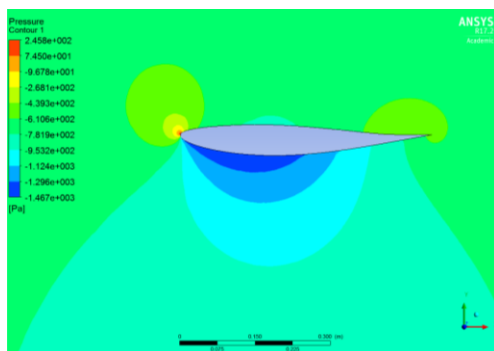
- Contorns de pressió per l'estudi del perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney amb Spallart – Allarmas de  $0^\circ$  a  $-5^\circ$

### Malla 1

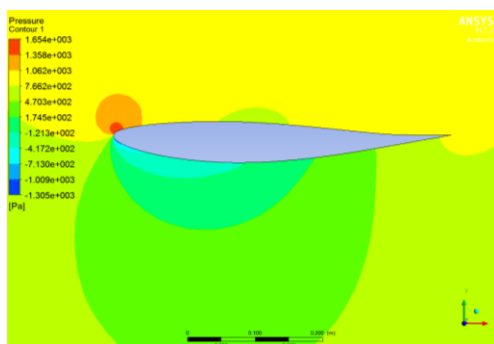
$0^\circ$



$-2^\circ$

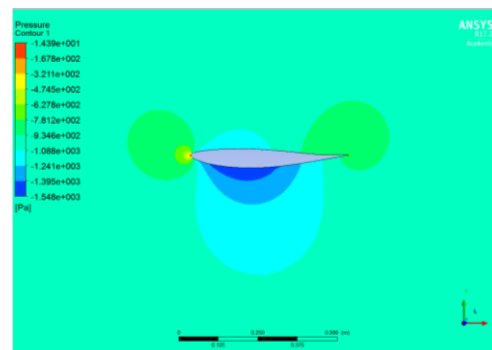


$-5^\circ$

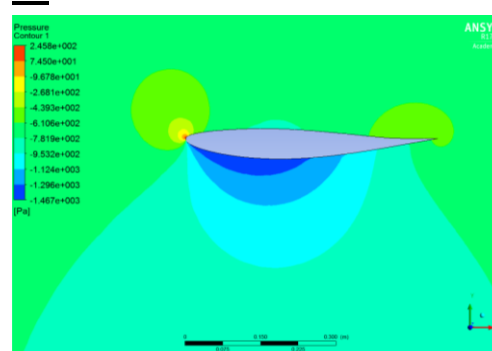


### Malla 2

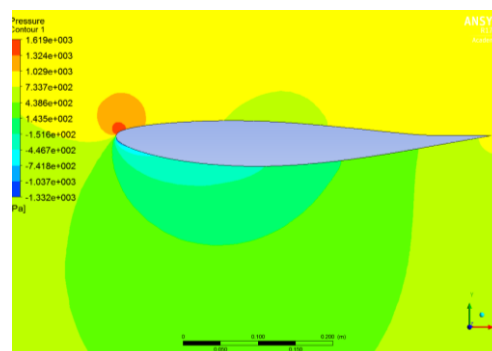
$0^\circ$



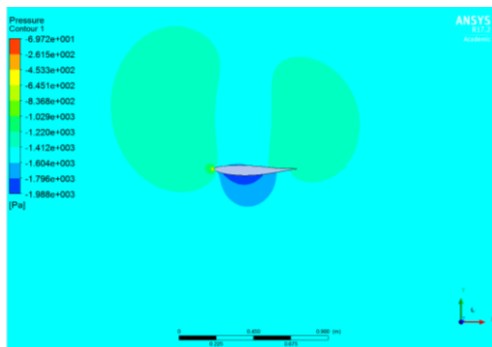
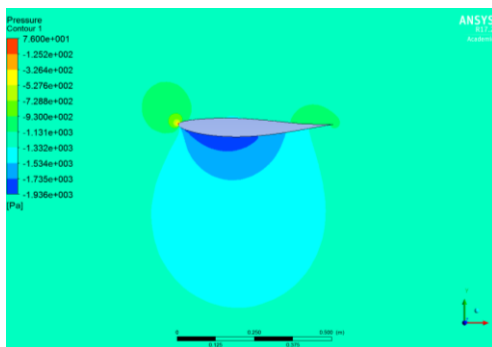
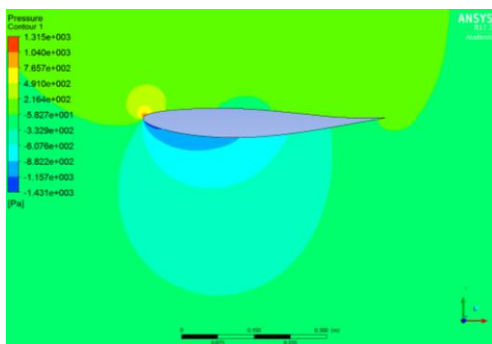
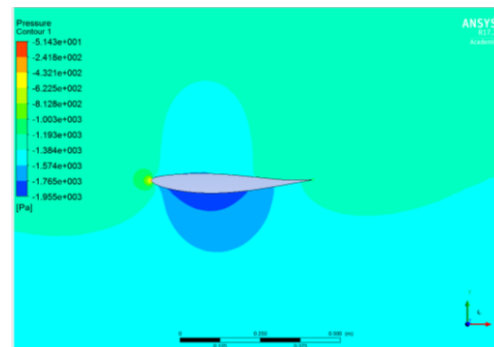
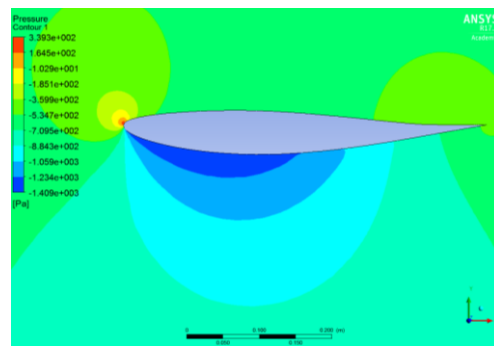
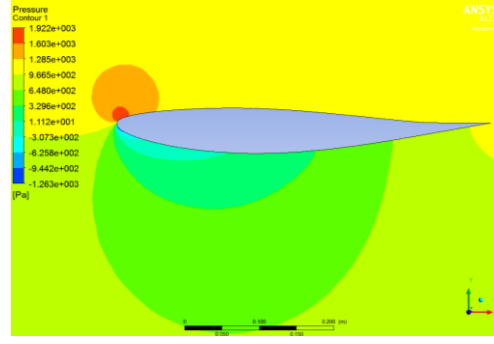
$-2^\circ$



$-5^\circ$



- Contorns de pressió per l'estudi del perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney amb  $K - \varepsilon$  de  $0^\circ$  a  $-5^\circ$

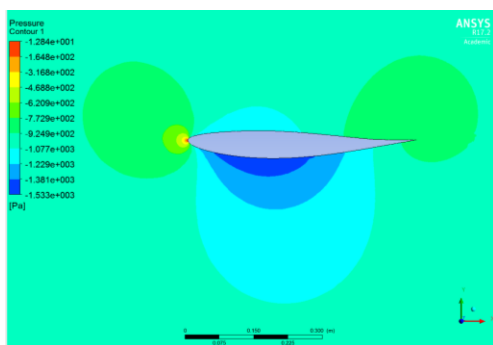
**Malla 1** **$0^\circ$**  **$-2^\circ$**  **$-5^\circ$** **Malla 2** **$0^\circ$**  **$-2^\circ$**  **$-5^\circ$** 



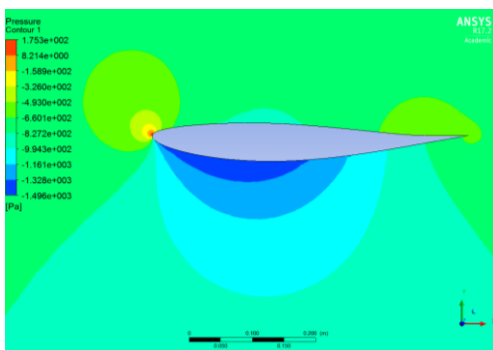
- Contorns de pressió per l'estudi del perfil NACA 63412 sense àlep de Gurney amb  $K - \omega$  de  $0^\circ$  a  $-5^\circ$

### Malla 1

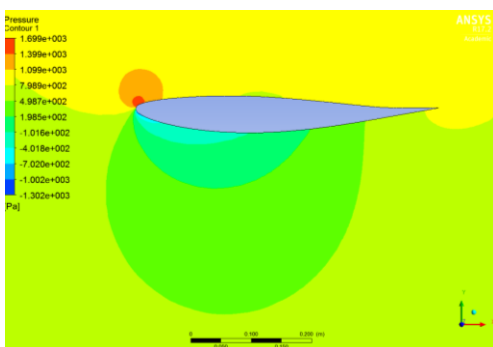
$0^\circ$



$-2^\circ$

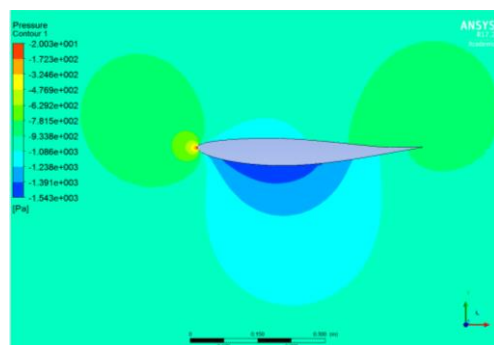


$-5^\circ$

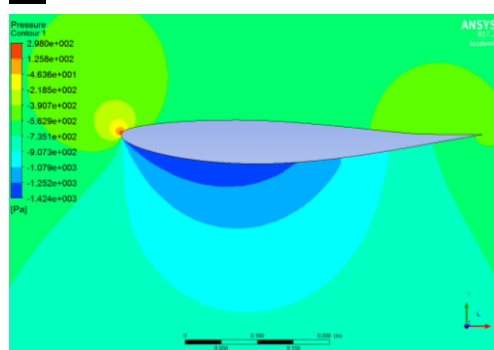


### Malla 2

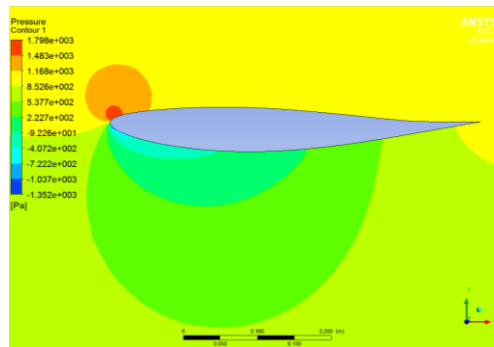
$0^\circ$



$-2^\circ$

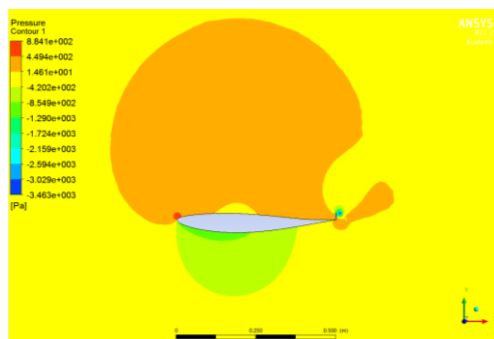


$-5^\circ$

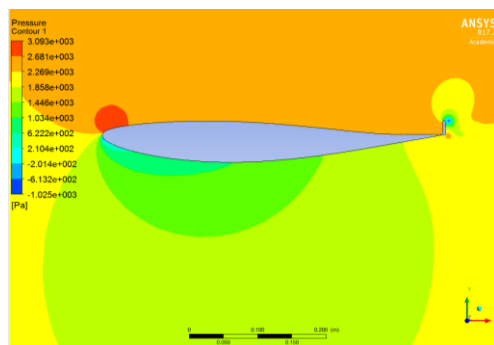


- Contorns de pressió per l'estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney amb Spallart – Allarmas de  $0^\circ$  a  $-5^\circ$

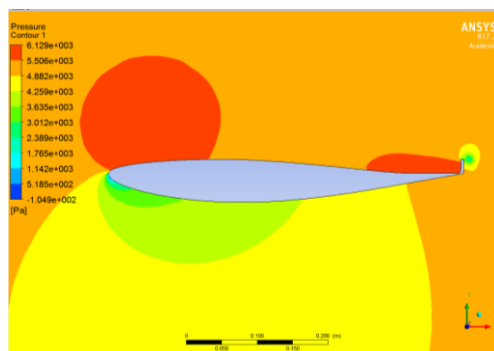
$0^\circ$



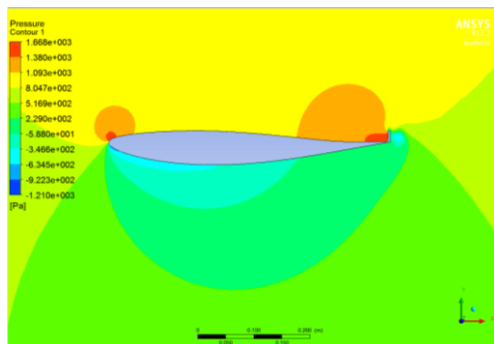
$-2^\circ$



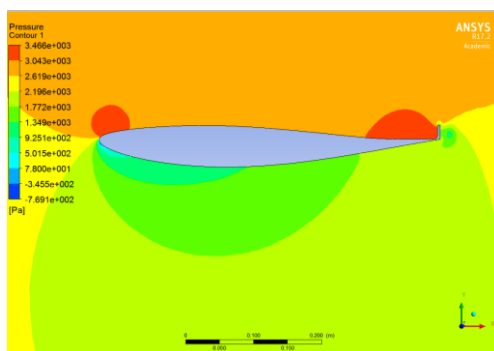
$-5^\circ$



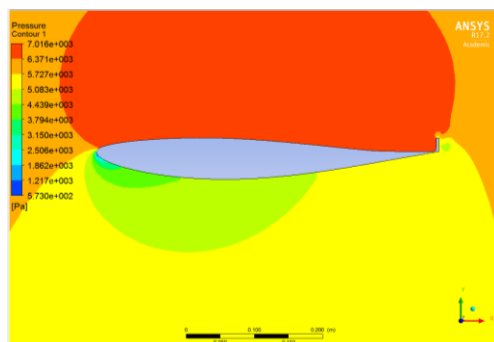
- 0°



-20

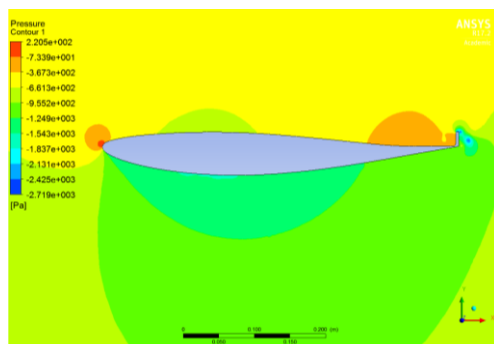


-50

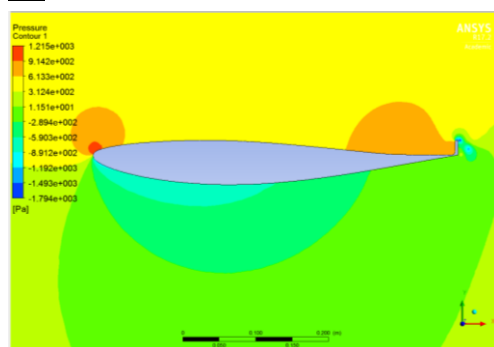


- Contorns de pressió per l'estudi del perfil NACA 63412 amb àlep de Gurney amb  $K$  -  $\omega$  de  $0^\circ$  a  $-5^\circ$

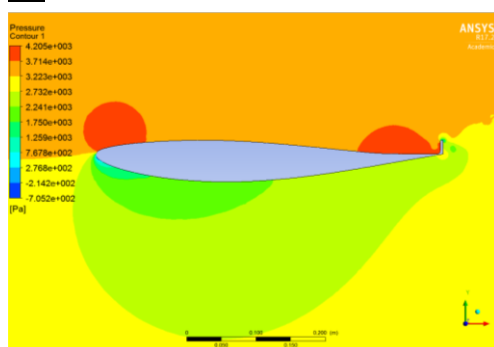
$0^\circ$



$-2^\circ$



$-5^\circ$





## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

[1] Daniel J. Walter, *Study of Aerofoils at High Angle of Attack, in Ground Effect*. RMIT UNIVERSITY. Setembre 2007.

[2] <http://www.formula1-dictionary.net/wings.html>

[3] <https://www.motor.es/formula-1/el-flap-gurney-sencillo-pero-muy-efectivo-201521169.html>

[4] Frank M. White, *Mecánica de Fluidos*. Mc Graw Hill. 5º Edición.

[5] <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n63412-il>

[6] [www.cfd-online.com/Tools/yplus.php](http://www.cfd-online.com/Tools/yplus.php)

[7] <http://finanzas.excite.es/cuanta-electricidad-consume-un-ordenador.html>

[8] [http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/C%20\\_%2020140720\\_Factores%20emision%20CO2%20y%20E%20%20Final\\_Primaria-CorrErrata\\_con%20portada.pdf](http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/C%20_%2020140720_Factores%20emision%20CO2%20y%20E%20%20Final_Primaria-CorrErrata_con%20portada.pdf)

[9] <http://servicios.elpais.com/gasolineras/>

[10] <http://tarifasgasluz.com/faq/precio-kwh>

### Bibliografia complementària

Yunus A. Çengel, John M. Cimbala; Fundamentos de mecànica de fluidos, Mc Grau Gill, 1ra edició 2014.

Apunts de l'assignatura de mecànica de fluids de l'ETSEIB.

Manuel López-Rivadulla Sáenz, *Análisis CFD de un flap Gurney instalado en perfiles NACA*. Universidad Carlos III de Madrid.